

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Domagoj Katinić**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Vera Rede, dipl. ing.

Student:

Domagoj Katinić

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mojoj mentorici Veri Rede na pomoći te velikom radu i trudu tijekom pisanja ovog rada. Također se zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na podršci tokom studija.

Domagoj Katinić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **DOMAGOJ KATINIĆ**

Mat. br.: 0035193636

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Akustična svojstva drva**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Acoustic properties of wood**

Opis zadatka:

Drvo je jedan od najstarijih tehničkih materijala s jedinstvenom kombinacijom fizikalnih, mehaničkih i tehnoloških svojstava zbog kojih je i danas optimalan materijal za mnoge primjere primjene od građevinskih konstrukcija, preko sportske opreme do glazbenih instrumenata. Kod glazbenih instrumenata od iznimne važnosti su akustična svojstva drva. Ova svojstva su važna i kod primjene drva u izolacijske svrhe. Poznato je da akustična svojstva drva ovise o njegovoj gustoći i Youngovom modulu elastičnosti. Osnovna značajka drva je ortotropnost mehaničkih svojstava u tri glavne osi: longitudinalnoj, radijalnoj i aksijalnoj.

U diplomskom radu potrebno je, za odabranu vrstu drva, odrediti gustoću te dinamički i statički modul elastičnosti u longitudinalnom smjeru. Na temelju dobivenih rezultata izračunati brzinu širenja zvuka unutar drva i usporediti rezultate dobivene pri statičkom i dinamičkom ispitivanju.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
27. rujna 2018.

Rok predaje rada:  
29. studenog 2018.

Predviđeni datum obrane:  
05. prosinca 2018.  
06. prosinca 2018.  
07. prosinca 2018.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD.....	1
2. GRAĐA I STRUKTURA DRVA .....	3
2.1. Biološka podjela.....	3
2.2. Struktura drva.....	4
2.2.1. Karakteristični presjeci drva .....	5
2.2.2. Presjek kroz deblo.....	6
2.2.3. Godovi.....	8
2.2.4. Građa drvne stanice.....	10
2.3. Mikrostruktura drva .....	11
2.3.1. Mikrostruktura četinjača .....	11
2.3.2. Mikrostruktura listača .....	12
2.4. Kemijski sastav .....	14
3. SVOJSTVA DRVA.....	17
3.1. Udio vlage .....	17
3.2. Mehanička svojstva.....	19
3.2.1. Čvrstoća .....	20
3.2.1. Modul elastičnosti .....	22
3.3. Akustična svojstva .....	25
3.3.1. Fizikalne veličine u akustici.....	26
3.3.2. Brzina zvuka .....	27
3.4. Primjena među glazbenim instrumentima.....	30
4. EKSPERIMENTALNI DIO .....	35
4.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja .....	35
4.2. Materijal za ispitivanje.....	35
4.3. Određivanje gustoće i udjela vlage .....	36
4.4. Ispitivanje savojnog modula elastičnosti uzoraka.....	39
4.4.1. Rezultati ispitivanja za brijest .....	41
4.4.2. Rezultati ispitivanja za hrast .....	45
4.5. Analiza rezultata .....	48
5. ZAKLJUČAK.....	51
LITERATURA.....	52
PRILOZI.....	54

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Osnovne vrste stabala.....	4
Slika 2.	Karakteristični presjeci drva.....	5
Slika 3.	Poprečni presjek debla.....	6
Slika 4.	Uzdžni presjek kroz deblo .....	7
Slika 5.	Tangencijalni presjek kroz deblo .....	7
Slika 6.	Godovi hrasta lužnjaka.....	8
Slika 7.	Poprečni presjek bora i hrasta s dijelovima goda .....	9
Slika 8.	Presjek biljne stanice .....	11
Slika 9.	Poprečni presjek kroz drvo četinjače.....	10
Slika 10.	Mikrostruktura drva listače .....	11
Slika 11.	Poprečni presjek kroz drvo listače.....	12
Slika 12.	Shema ukupnog kemijskog sastava drva.....	14
Slika 13.	Dijagram ovisnosti udjela vlage o gustoći .....	19
Slika 14.	Dijagram prigušenja vibracija zvuka.....	29
Slika 15.	Gudački instrumenti .....	31
Slika 16.	Harfa.....	31
Slika 17.	Gitara .....	32
Slika 18.	Čembalo.....	32
Slika 19.	Oboa .....	33
Slika 20.	Fagot.....	33
Slika 21.	Vibrafon.....	34
Slika 22.	Set bubnjeva s činelama .....	34
Slika 23.	Položaj godova u odnosu na savjonu silu.....	35
Slika 24.	Uzorak drva brijesta za ispitivanje gustoće .....	36
Slika 25.	Uzorak hrasta lužnjaka za ispitivanje gustoće.....	37
Slika 26.	Kidalica MESSPHYSIK BETA 50-5.....	39
Slika 27.	Metoda savijanja u tri točke .....	40
Slika 28.	Ispitni uzorak na kidalici neposredno prije opterećivanja.....	40
Slika 29.	Određivanje modula elastičnosti metodom savijanja u tri točke.....	41
Slika 30.	Uzorci brijesta nakon ispitivanja .....	41
Slika 31.	Uzorci hrasta lužnjaka nakon ispitivanja na kidalici.....	45
Slika 32.	Vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti uzoraka brijesta.....	48
Slika 33.	Vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti među uzorcima hrasta.....	49
Slika 34.	Vrijednosti brzine zvuka za uzorke brijesta .....	49
Slika 35.	Vrijednosti brzine zvuka za uzorke hrasta .....	50

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrijednosti udjela vlage ovisno o vrsti drva.....	18
Tablica 2. Osnovna svojstva nekih svojstva drva.....	20
Tablica 3. Čvrstoća važnijih vrsta drva.... ..	21
Tablica 4. Modul elastičnosti važnijih svojstva drva .....	23
Tablica 5. Brzina zvuka za neke vrste materijala .....	28
Tablica 6. Gustoća i udio vlage uzoraka .....	37
Tablica 7. Rezultati ispitivanja uzoraka brijesta .....	42
Tablica 8. Oznake veličina i mjernih jedinica .....	43
Tablica 9. Vrijednosti za statički i dinamički modul elastičnosti te brzinu zvuka.....	44
Tablica 10. Rezultati ispitivanja uzoraka hrasta lužnjaka .....	46
Tablica 11. Rezultati brzine zvuka te statičkog i dinamičkog modula elastičnosti hrasta .....	47

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$A$	dB	Amplituda frekvencije u vremenu $t$
$A_0$	dB	Amplituda frekvencije u vremenu $t=0$
$c$	m/s	Brzina zvuka
$dFM$	mm	Prosječni progib grede
$E$	GPa	Modul elastičnosti
$E_f$	GPa	Savojni (statički) modul elastičnosti
$E_{fd}$	GPa	Dinamički modul elastičnosti
$E_L$	GPa	Modul elastičnosti u longitudinalnom smjeru
$E_R$	GPa	Modul elastičnosti u radijalnom smjeru
$E_T$	GPa	Modul elastičnosti u tangencijalnom smjeru
$F_{max}$	N	Maksimalna sila pri lomu uzorka
$f_R$	Hz	Rezonantna frekvencija
$k$	$m^4 (kgs)^{-1}$	Akustička konstanta materijala
$m_o, m_2$	kg	Masa osušenog drva
$m_u, m_1$	kg	Masa vlažnog drva
$m_w$	kg	Masa drva
$Q$	-	Faktor kvalitete
$R$	$m^4 (kgs)^{-1}$	Koeficijent radijacije zvuka u materijalu
$smax$	mm	Maksimalni progib grede
$t$	s	Vrijeme
$t_R$	s	Period
$V_w$	$m^3$	Volumen drva
$w$	%	Udio vlage
$z$	$Pa s m^{-3}$	Akustična impedancija materijala
$\delta$	-	Logaritamsko smanjenje
$\varepsilon fM$	%	Istezljivost
$\eta$	-	Koeficijent gubitka
$\vartheta$	$m^4 (kgs)^{-1}$	Prigušenje zvuka
$\rho$	$kg/m^3$	Gustoća
$\rho_{12}$	$kg/m^3$	Gustoća pri udjelu vlage od 12 %
$\rho_w$	$kg/m^3$	Gustoća drva
$\sigma fM$	MPa	Savojna čvrstoća
$\psi$	°	Kut gubitka



## SAŽETAK

U radu je određena brzina širenja zvuka na dvije vrste drva – hrastu i brijestu. Brzina širenja zvuka je jedno od važnijih akustičnih svojstava drva i drugih tehničkih materijala, a ovisi o modulu elastičnosti i gustoći. S obzirom na usmjerenost građe i svojstava drva, sva ispitivanja su provedena u longitudinalnom smjeru, gdje je vrijednost modula elastičnosti najviša. Srednja vrijednost dinamičkog modula elastičnosti za hrast je 17,39 GPa, a za brijest je 10,05 GPa. Gustoća hrasta iznosi 0,759 g/cm<sup>3</sup>, a brijesta 0,532 g/cm<sup>3</sup>. Rasipanje rezultata za modul elastičnosti je veliko za obje vrste drva, pogotovo kod uzoraka hrasta. Vrijednost brzine širenja zvuka kod hrasta je za  $\approx 10$  % viša nego kod brijesta, iako je modul elastičnosti hrasta za 73 % viši od modula elastičnosti za brijest, a gustoća viša za 43 %.

Ključne riječi: drvo, akustična svojstva, brzina širenja zvuka.

## **SUMMARY**

In this study, sound velocity was determined between two types of wood – oak and elm. The sound velocity is one of the most important acoustic properties of wood and other technical materials, which is influenced by modulus of elasticity and also density. Depending on the orthotropic structure and properties of wood, all tests were conducted in longitudinal direction in which the modulus of elasticity has the highest value. The mean values of dynamic modulus of elasticity of oak and elm woods were 17,39 GPa and 10,05 GPa, respectively. Density of the oak was 0,759 g/cm<sup>3</sup> and density of the elm was 0,532 g/cm<sup>3</sup>. Scattering of experimental data was large, especially for the oak. The sound velocity of the oak was calculated  $\approx 10$  % higher than that of the elm, although the modulus of elasticity of the oak were 73 % higher and the density was 43 % higher, in comparison with the elm.

Key words: wood, acoustic properties, sound velocity.

## 1. UVOD

Drvo ima vrlo važnu ulogu u današnjem svijetu još od samog početka civilizacije. Prvi ljudi su ga koristili u razne svrhe kao što su dijelovi oružja i oruđa, kao materijal za izolaciju ili pak kao ogrijevni materijal. Uz kamen i glinu, drvo je bilo prvi tehnički materijal kojeg su prvi ljudi primijenjivali kako bi učinili svoj život jednostavnijim što je omogućilo bolji napredak čovječanstva u svakom smislu.

Drvo se oduvijek koristilo za veliki broj namjena i različitih proizvoda kao što su alati u poljoprivredi, razne nastambe, primitivna vozila, oružje, obuća, posuđe, mostovi i sl. Također, neki dijelovi drva kao što su kora, plodovi i listovi, koristili su se u prehrambene i druge svrhe što je povećavalo njegovu uporabivost i učinkovitost. Energija koja se dobije izgaranjem drva dala je veliki doprinos razvoju industrije, a drvo je i danas glavni izvor energije za veći dio svjetske populacije.

Osim što proizvode drvo za konstrukcijsku i energetska primjenu, šume pozitivno utječu na ekosustav i ljudski život općenito što uključuje:

- zadržavanje vode u tlu
- proizvodnja kisika
- povoljni utjecaj na klimu
- vezanje CO<sub>2</sub> za sebe što smanjuje njegovu emisiju u atmosferu
- sprječavanje erozije tla
- veliki estetski značaj
- povoljni utjecaj na bioraznolikost

Zbog svoje visoke čvrstoće uz istovremeno nisku gustoću te jednostavne obrade, drvo se u velikoj mjeri primjenjuje u brodogradnji, građevinarstvu, poljoprivredi, proizvodnji vozila, rudarstvu, obrtništvu, kućanstvu i tekstilnoj industriji. Kao sirovina služi za proizvodnju papira i celuloze.

Iako se drvo u primjeni nastoji zamijeniti kompozitnim, metalnim i polimernim materijalima, kao obnovljivi materijal i dalje ima značajan udio u primjeni.

Kao prirodan konstrukcijski materijal, drvo se primjenjuje u neobrađenom stanju, ali i u fizikalno i kemijski modificiranom stanju, čime se znatno umanjuju prirodni nedostaci drva.

Drvo se mehanički može obraditi na različite načine: cijepanjem, tesanjem, blanjanjem, piljenjem, mljevenjem, tokarenjem, glodanjem, tlačenjem itd.

Kemijskom obradom drva (koksiranjem, suhom destilacijom, ekstrakcijom, hidrolizom itd.) dobivaju se proizvodi široke primjene:

- štavila (tanin) za industriju kože
- smole koje služe pri proizvodnji umjetnih tvari, lakova, sikativa itd.
- drveni ugljen koji se upotrebljava u metalurgiji za proizvodnju elektroda, crnog baruta, kao apsorbenti, dekoloransi itd.
- octena kiselina za potrebe kemijske i prehrambene industrije, u galvanizaciji te za bojenje
- drveni katran, drvni plin, celuloza za proizvodnju papira, metilni alkohol, lignin itd.

## 2. GRAĐA I STRUKTURA DRVA

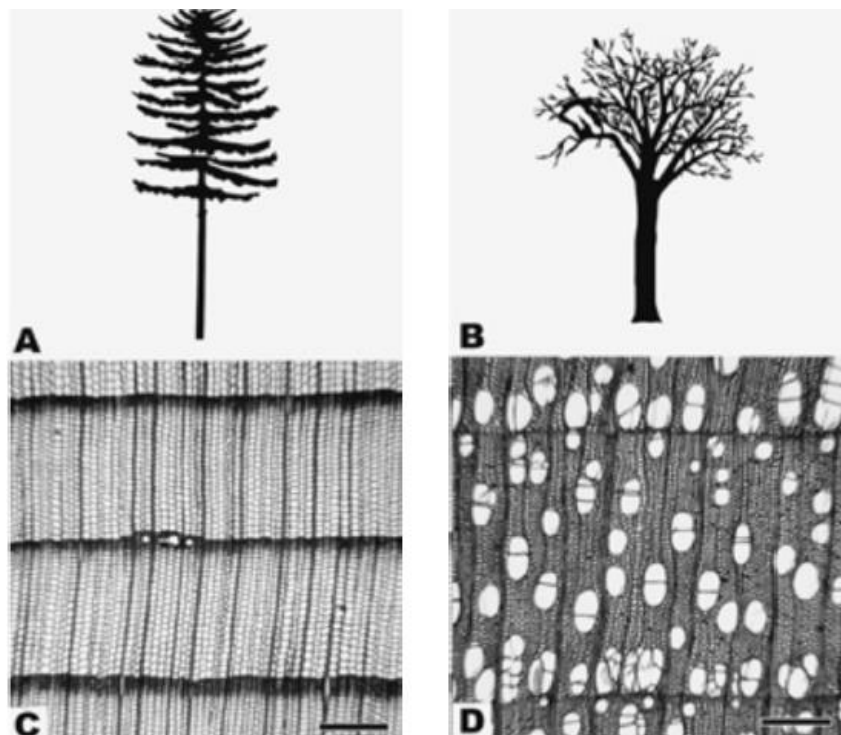
### 2.1. Biološka podjela

Većina vrsta drva koja su danas prisutna u industriji pripadaju skupini cvjetnica ili sjemenjača, a dijele se na listače i četinjače, što prikazuje slika 1. Drugi naziv za drvo četinjača je *meko drvo* (engl. softwood), a za drvo listača *tvrd drvo* (engl. hardwood). Ti nazivi nisu nužno vezani za stvarnu tvrdoću drva. Listače su učestalija vrsta drva od četinjača i broje oko 2000 vrsta od kojih se većina nalazi u tropskim krajevima.

Četinjače pripadaju skupini golosjemenjača od kojih su u našim krajevima najpoznatije vrste smreka, jela i bor. Rastu na sjevernoj polutki te su uglavnom zimzelene što znači da ne gube listove zimi, po kojima su i dobile naziv.

Listače pripadaju skupini kritosjemenjača, a zajednički naziv im je i bjelogorica. One u jesen ostaju bez lišća, a tipične vrste su bukva, hrast, breza, javor, jasen i dr.

Svako stablo se sastoji od tri glavna dijela: deblo, korijen i krošnja. Svaki dio stabla ima svoju funkciju koja je vrlo važna. Deblo podupire krošnju te omogućuje provođenje mineralnih tvari i vode od korijena prema krošnji, a rezervne tvari i šećeri pohranjeni su u dubljim slojevima debla. Sustav korijenja osigurava stabilnost stablu te iz tla apsorbira vodu i mineralne tvari. U krošnji se nalazi lišće, grane te izboji. Listovi upijanjem ugljičnog dioksida iz atmosfere uzimaju energiju iz sunčeve svjetlosti i u procesu fotosinteze proizvode složene ugljikove spojeve – ugljikohidrate kao i kisik. Hranjive tvari iz listova se prenose prema donjim dijelovima stabla kroz unutarnji sloj kore [1].



**Slika 1. Osnovne vrste stabala [2]**

Opći oblik stabla četinjača (A) i listača (B)

Poprečni presjek kroz deblo četinjača (C) i listača (D)

## 2.2. Struktura drva

Da bi se predvidjelo njegovo ponašanje u različitim uvjetima primjene i iskoristile njegove prednosti, a eliminirali nedostaci, treba prije svega dobro upoznati građu drva jer su svojstva bilo kojeg materijala uvijek posljedica strukture.

Drvo je nehomogen, anizotropan, porozan i vlaknast materijal sastavljen od celuloze (40-50%), lignina (25%-30%), drvnih polioza (20-30%) te popratnih tvari (smole, minerali i dr.). Svojstva drva su rezultat njegovog prirodnog porijekla tj. strukture [3].

### 2.2.1. Karakteristični presjeci u drvu

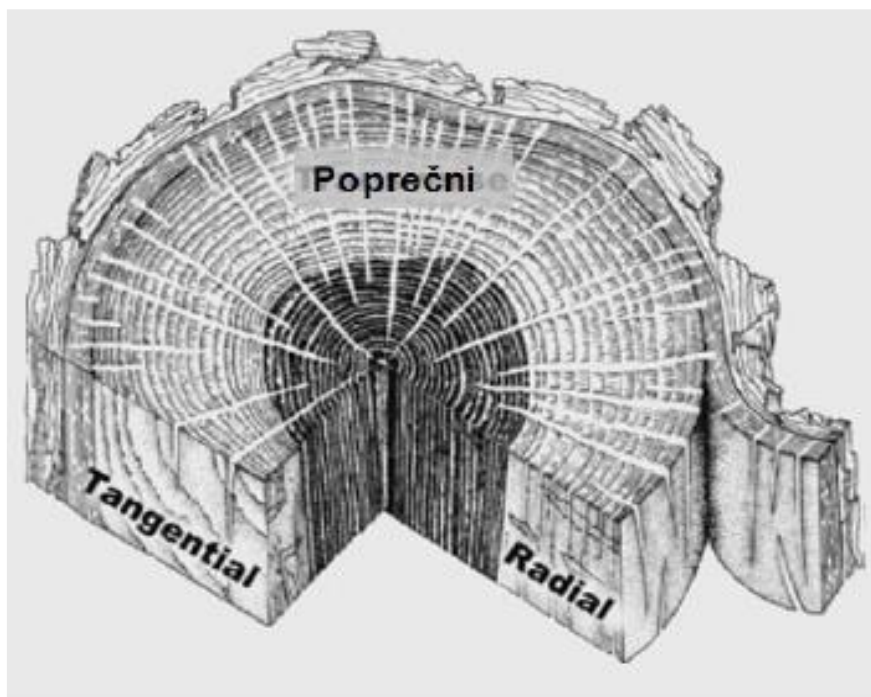
Zbog usmjerenosti strukture drva i njenih karakteristika u različitim smjerovima, za analizu mikrostrukture i svojstava drva, potrebno je drvo promatrati u tri različita presjeka: poprečnom, radijalnom i tangencijalnom.

Poprečni presjek je okomit na uzdužnu os debla i na drvena vlakanca. Na njemu se vidi građa od srčike prema kori, a ne vide se promjene mikrostrukture uzduž debla.

Radijalni presjek se nalazi u ravnini omeđenoj radijusom i uzdužnom osi debla. Taj presjek bi nastao cijepanjem debla posred srčike. U njemu se mogu promatrati promjene u strukturi od srčike prema kori, uzduž osi debla.

Tangencijalni presjek je okomit na radijalni, a okomit je na radijus valjka debla te paralelan s uzdužnom osi debla. Samo promatranje i analiza u sva tri presjeka dat će pravu i potpunu sliku o mikrostrukтури i o svojstvima drva [1].

Odnos između ova tri karakteristična presjeka prikazuje slika 2.



Slika 2. Karakteristični presjeci drva [2]

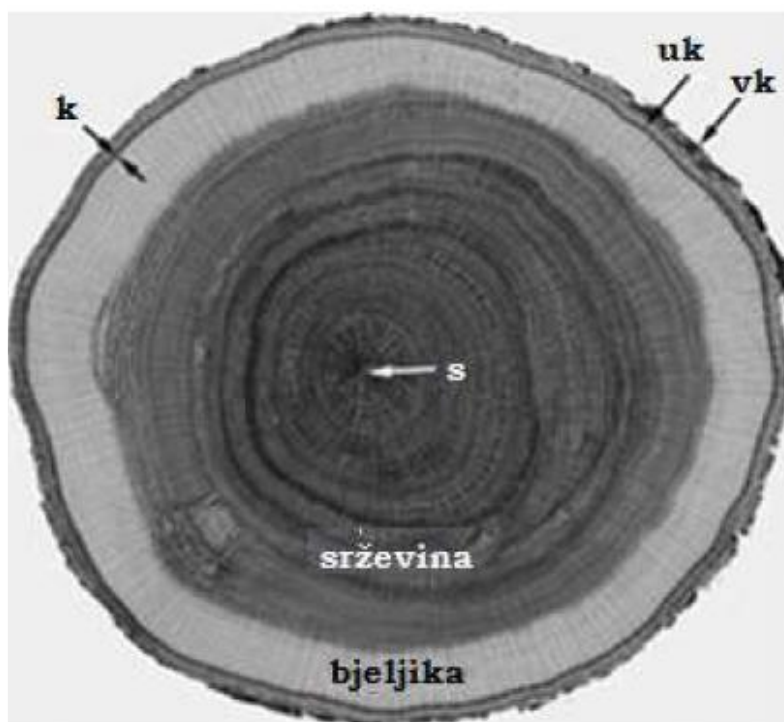
### 2.2.2. Presjek kroz deblo

Promatra li se građa drva na razini mikrostrukture, uočavaju se celulozna vlakna, vezivo (lignin) i praznine. U živoj biljci ova struktura ima trostruku ulogu: provodi produkte izmjene tvari, čuva te tvari te deblu biljke daje potrebnu mehaničku čvrstoću [4].

Da bi se detaljno prikazala struktura drva, potrebno je promatrati sva tri presjeka debla. Na slici 3. prikazan je poprečni (radijalni) presjek kroz deblo. Gledano s vanjske strane razlikuju se slojevi: vanjska kora, unutarnja kora, kambij, bjeljika, srževina i srčika.

Na slici 4. prikazan je uzdužni ili aksijalni presjek na kojem se, s desna na lijevo, vide vanjska i unutarnja kora, tanki sloj kambija te dio zadnjeg goda.

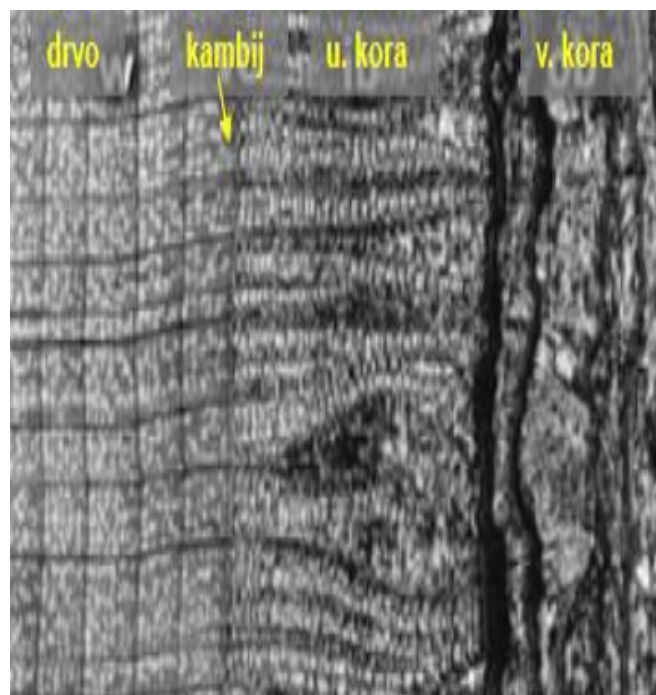
Slika 5. prikazuje tangencijalni presjek kroz vaskularni kambij, gdje se vide inicijalne stanice iz kojih će se razviti poprečno i uzdužno orijentirani elementi sekundarnog žilnog stanića - ksilema i floema [1].



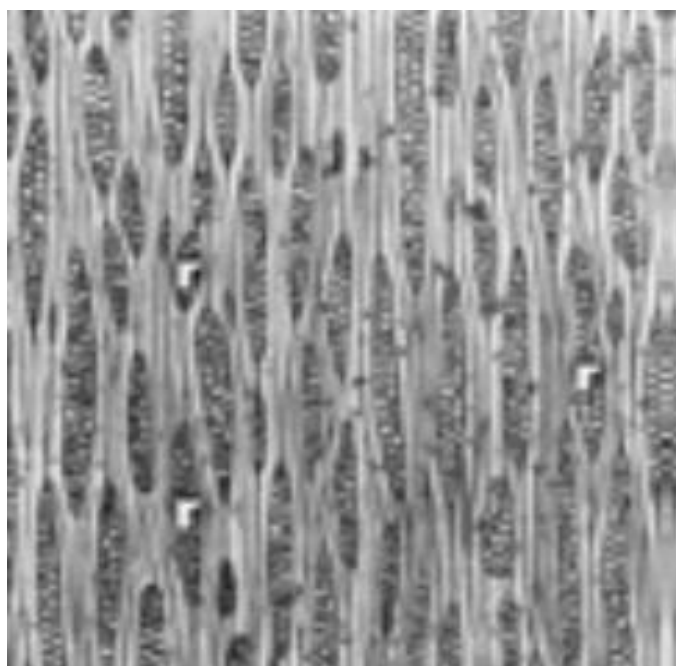
**Slika 3. Poprečni presjek debla [2],**

vanjska kora (vk), unutarnja kora (uk), kambij (k), bjeljika, srževina i srčika (s)





**Slika 4. Uzdužni presjek kroz deblo, kambij i koru [2]**



**Slika 5. Tangencijalni presjek kroz vaskularni kambij [2]**

Vanjska kora ima ulogu zaštite unutarnje kore i cijelog debla od isušivanja. Ispod vanjske kore nalazi se unutarnja kora (floem) kojom se prenose produkti fotosinteze od listova prema korijenu ili dijelovima biljke kojima je potrebna energija. Između kore i drvnog tkiva nalazi se tanki sloj vaskularnog kambija iz kojeg nastaje u unutarnjem smjeru novi sloj drva (sekundarni ksilem) svakog proljeća (u našoj klimi), a u vanjskom smjeru raste novi sloj unutarnje kore (sekundarni floem). Odnos širine floema i ksilema jedne vegetacijske sezone je  $\approx 1:10$ .

Bjeljika je živi sloj drva kroz koji prolaze voda i u njoj otopljene mineralne tvari od korijena prema lišću. Osim toga ovdje se sintetiziraju i pohranjuju škrob i lipidi, što može značajno utjecati na trajnost drva i njegovu obradivost.

Bjeljika je svjetlija od srčevine koja se nalazi ispod nje. U srčevini se talože razne biokemijske tvari koje se zovu ekstraktivi. Zbog njih srčevina ima tamniju boju, a kondukcija vode i mineralnih tvari je onemogućena. Mehanička i tehnološka svojstva te trajnost drva ovise o vrsti i količini ekstrahiranih tvari. U centru drvnog valjka nalazi se srčika te ostatak tkiva koji je nastao u ranoj fazi rasta stabla dok ono još nije bilo formirano [1].

### 2.2.3. Godovi

God ili godišnji prirast u debljinu je cjelokupna masa sekundarnog stabla nastala tijekom jednoga vegetacijskog razdoblja.

Slika 6. prikazuje godove na poprečnom presjeku hrasta lužnjaka.



Slika 6. Godovi hrasta lužnjaka u poprečnom presjeku debla [6]

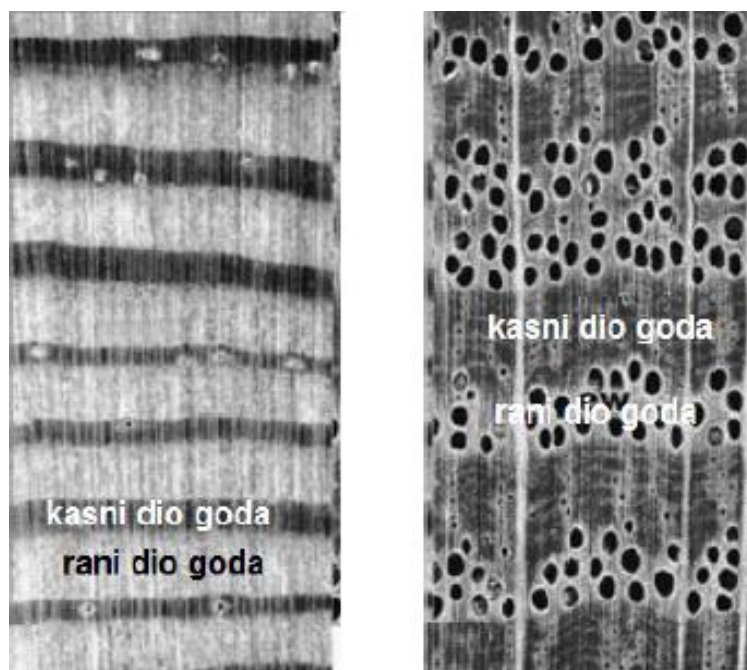
Kambij koji proizvodi godove, aktivan je tijekom cijelog životnog vijeka biljke. Može imati periodičan rad u područjima, gdje postoji smjena razdoblja kiše i suše, odnosno ljeta i zime. U pojedinim će razdobljima nastanak sekundarnog drva i kore biti intenzivniji. Kod vrsta koje rastu u tropskom i suptropskom području, gdje su uvjeti uglavnom ujednačeni, godovi se ne mogu razgraničiti [5].

Stanice koje nastaju na početku vegetacijske sezone zovu se rani dio goda ili rano drvo, a stanice koje nastaju kasnije čine kasni dio goda ili kasno drvo.

Na slici 7. prikazan je poprečni presjek jedne četinjače i jedne listače gdje se vide godovi s jasno razgraničenim ranim i kasnim dijelom.

S obzirom na izgled stanica ranog i kasnog dijela goda sve vrste drva mogu se svrstati u jednu od tri sljedeće skupine:

- vrste čiji se unutarnji promjer provodnih elemenata postepeno smanjuje od ranog prema kasnom drvu
- vrste čiji se unutarnji promjer provodnih elemenata naglo smanjuje od ranog prema kasnom drvu
- vrste kod kojih ne postoji razlike između stanica (provodnih elemenata) ranog i kasnog dijela goda [1].



**Slika 7. Poprečni presjek bora (četinjača) i hrasta (listača)  
s naznačenim dijelovima goda [2]**

Na poporečnom presjeku pojedninačni godovi mogu biti manje ili više istaknuti odnosno markantni. Većina četinjača ima markantnije godove od listača.

Godovi se još mogu razlikovati po širini, po tijeku granične linije i po boji [1].

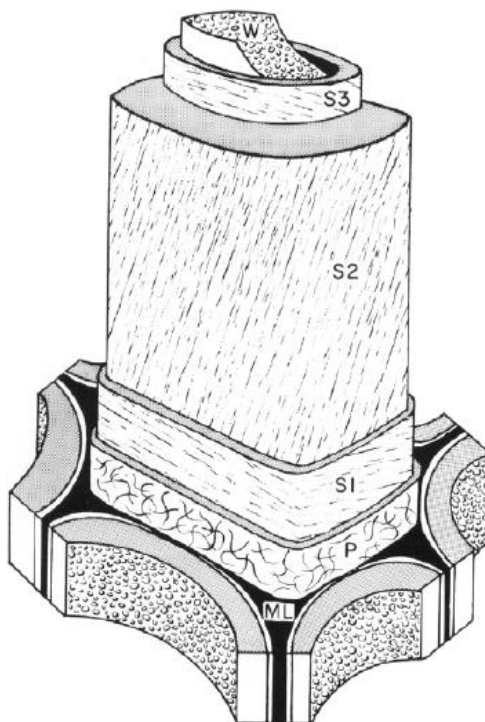
Godovi imaju vrlo važan utjecaj na svojstva drva budući da je drvo izrazito anizotropan i nehomogen materijal. Dokaz toga je činjenica da iznos vlačne čvrstoće može biti i nekoliko destaka puta veći u smjeru godova nego u smjeru okomitom na godove.

#### 2.2.4. Građa drvne stanice

Stanica drva je građena kao i svaka stanica bilo koje druge biljke. Sastoji se od stanične stijenke i protoplasta (stanične tvari). Protoplasti su živa tvar okružena staničnom membranom, a stanična stijenka je neživa tvar izgrađena uglavnom od ugljikohidrata. Ona je propusna čvrsta struktura koja štiti stanicu od previsokog osmotskog tlaka, osigurava mehaničku potporu i daje joj stalan oblik [1].

Drvna stanica podrazumijeva mrtvu biljnu stanicu bez plazmatskog sadržaja. Prazni prostor omeđen staničnom stijenkom u kojem su se prije nalazili protoplasti zove se lumen. On je važan jer ima funkciju upijanja vlage i formiranja drvnih kompozita.

Na slici 8. prikazana je drvna stanica.



Slika 8. Drvna stanica [7]

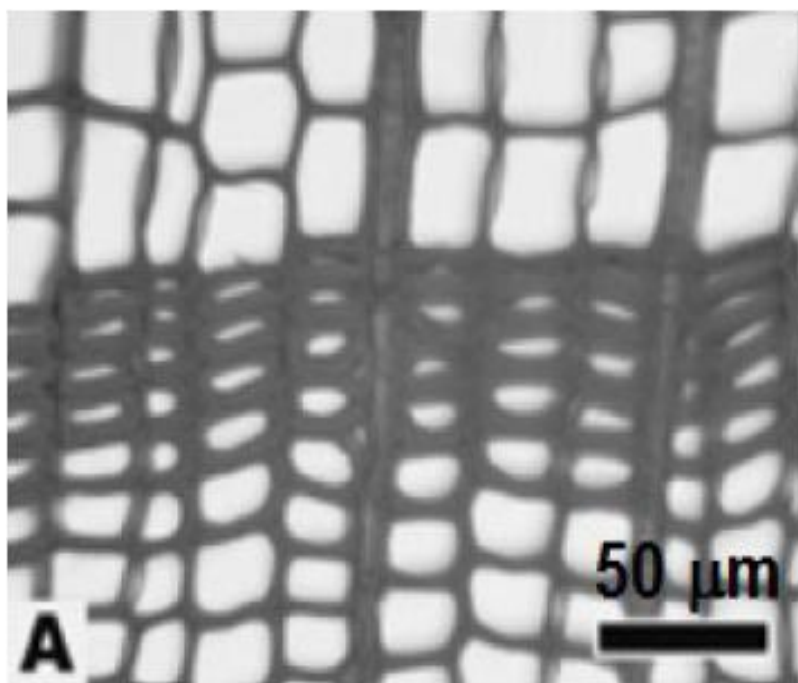
## 2.3. Mikrostruktura

### 2.3.1. Mikrostruktura četinjača

Mikrostruktura četinjača je mnogo jednostavnija od mikrostrure listača te sadrži traheide koje su usmjerene uzdužno (aksijalno) i parenhimne stanice u drvnim tracima usmjerene poprečno (radijalno), od srčike prema kori debla.

Traheide su izdužene stanice s omjerom između duljine i širine od oko 100:1. Volumni udio traheida u četinjačama iznosi preko 90 %, a njihova uloga je provođenje vode i mehanička potpora.

Na slici 9. je prikazana mikrostruktura četinjača [1].



Slika 9. Poprečni presjek kroz drvo četinjače [2]

Na poprečnom presjeku kroz drvo četinjače vide se traheide orijentirane po uzdužnoj osi debla. Traheide ranog i kasnog dijela goda razlikuju se po veličini lumena i debljini stjenke, a zajednički im je oblik poprečnog presjeka - kvadratni ili pravokutni. Traheide imaju veći lumen i tanju staničnu stijenku u ranom dijelu goda nego u kasnom dijelu goda. U našem klimatskom području tijekom prvog dijela godine ima puno padalina i biljke imaju dosta vode koju treba provesti od korijena do najviših dijelova pa zato stanice u ranom dijelu goda imaju tanku stijenku i veliki lumen. U drugom dijelu godine količina dostupne vode se smanjuje pa



stanice imaju sve manji lumen i sve deblju stijenku. Stanice koje imaju manji lumen i deblju stijenku, čvršće su i više povećavaju mehaničku otpornost drva od stanica u ranom godu.

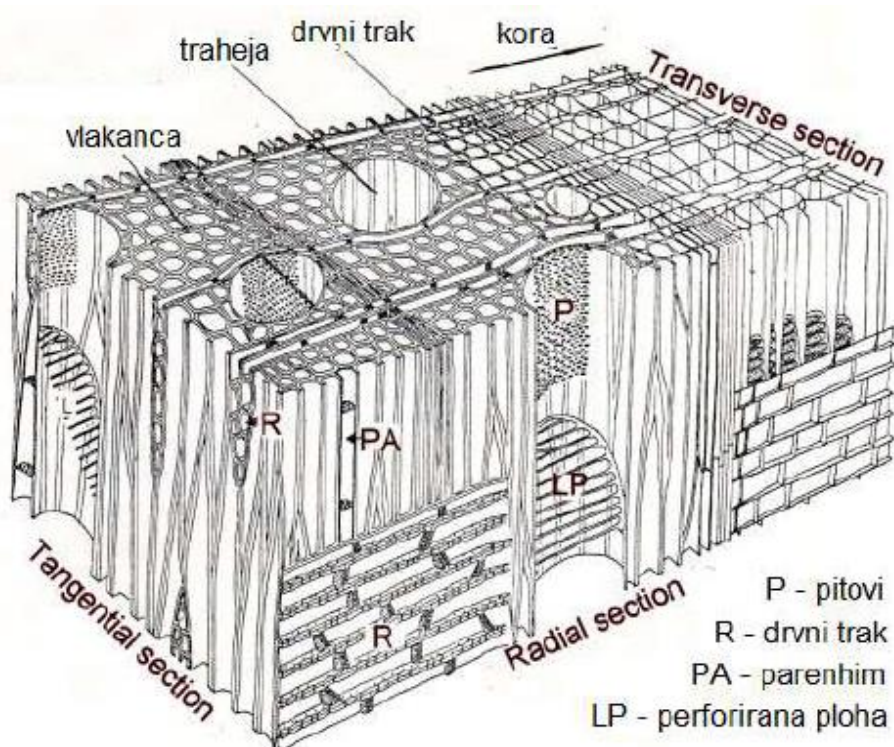
Drvne trake čine parenhimne stanice. Drvni traci su radijalno usmjereni od srčike prema periferiji debla. Osnovna uloga parenhimnih stanica je tvorba, pohrana i lateralni transport hranjivih tvari i vode. Imaju prizmatični oblik, visina im je oko 15  $\mu\text{m}$ , širina oko 10  $\mu\text{m}$  i duljina 150 do 250  $\mu\text{m}$  [1].

### 2.3.2. Mikrostruktura listača

Mikrostruktura listača u uzdužnom ili aksijalnom smjeru sastoji se od drvnih vlakanaca, traheja i traheida koje se razlikuju po veličini i rasporedu. Osim toga u strukturi se nalaze i različito raspoređene parenhimne stanice. Sve navedene tvorbene jedinice značajno utječu na mehanička, fizikalna, preradbena i druga svojstva drva.

Na slici 10. nalazi se prostorni prikaz strukture listača.

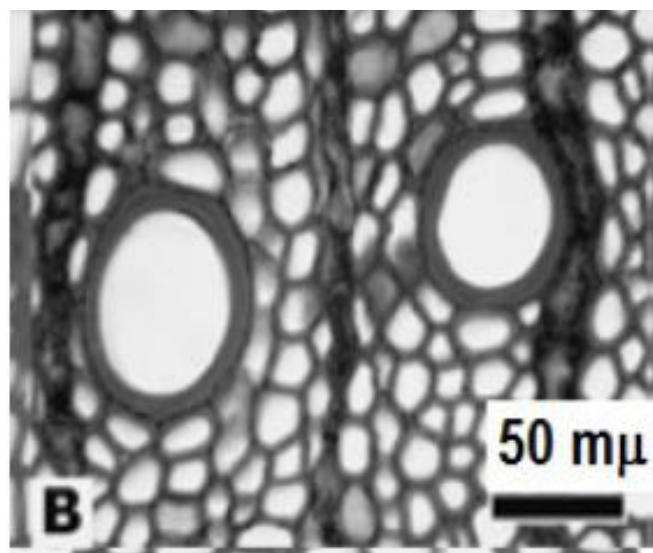
Radijalni sustav listača izgrađen je od parenhimnih stanica koje se međusobno razlikuju po veličini, obliku i drugim značajkama [1].



Slika 10. Mikrostruktura drva listače [8]

Traheje ili pore su velike provodne stanice koje su međusobno povezane i nastavljaju se jedna na drugu u uzdužnom smjeru. Međusobno su spojene preko perforiranih površina koje su, ovisno o vrsti, različito građene. To su strukturni elementi po kojima se listače razlikuju od četinjača. Traheje provode veliku količinu vode od korijena prema gore [1].

Na slici 11. vidi se mikrostruktura drva listače u poprečnom presjeku.



Slika 11. Poprečni presjek kroz drvo listače [2]

Kod različitih vrsta drva traheje se razlikuju po veličini i rasporedu unutar goda. Kod nekih vrsta traheide su podjednako velike u ranom i kasnom dijelu goda i ravnomjerno su raspoređene kroz cijeli god. Takve vrste drva zovu se difuznoporzne. Kod nekih vrsta drva traheje su koncentrirane u ranom dijelu goda i takve vrste zovu se prstenasto-porzne.

Drvena vlakanca su vrlo duge stanice, dva do deset puta dulje od traheja. Njihova duljina iznosi od 200 do 1200  $\mu\text{m}$ , a širina im je upola manja. Imaju relativno debelu stijenku i uski lumen. Njihova glavna uloga je mehanička potpora, a debljina stijenke utječe na gustoću i mehanička svojstva svake pojedine vrste.

Na slici 11. vide se i aksijalne parenhimne stanice koje imaju tanku stijenku i veliki lumen. S obzirom na vrstu mogu se pojaviti u različitim formacijama. Ponekad su grupirane uz velike provodne sudove, a ponekad neovisno o njima. Njihov oblik i raspored pomaže kod identifikacije vrste [1].

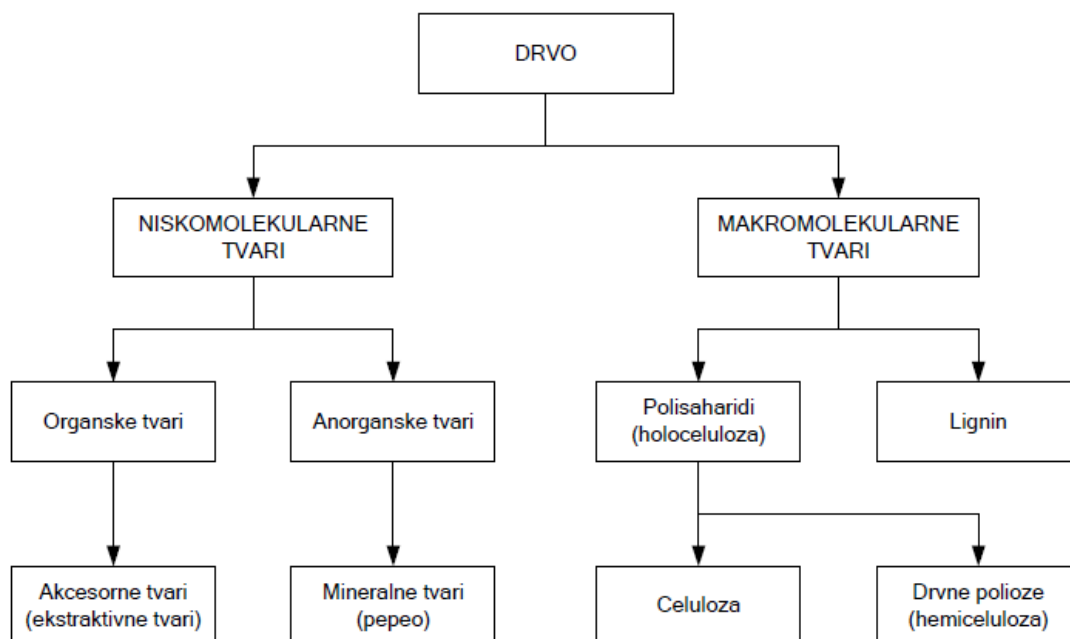
Kod nekih listača u aksijalnom sustavu mogu se naći i traheide koje imaju provodnu ulogu i utječu na mehaničku potporu. Stanična stijenka im je tanka i kraće su od drvnih vlaknaca kod iste vrste drva.

Drvni traci listača, ovisno o vrsti, mogu imati puno različitih oblika. Kod većine vrsta širina drvnih traka je od 1 do 5 stanica, a kod nekih vrsta može biti i puno veća. U visinu idu do najčešće 1 mm. Drvni traci su ravnomjerno raspoređeni po cijelom presjeku debla [1].

## 2.4. Kemijski sastav

Poznavanje kemijskog sastava drva važno je za znanstvena istraživanja drva kao prirodne tvari, za biokemiju i fiziologiju drva, a isto tako za tehnološku preradu i obradu drva, što naročito dolazi do izražaja kod kemijske prerade, površinske obrade, zaštite drva i sličnih postupaka. Važno je napomenuti kako još nije do kraja poznato kako su pojedine tvari drva povezane u staničnim stijenkama te da li su veze kemijskog (kovalentne) ili fizikalnog (molekularne) karaktera.

Što se tiče komponenata kemijskog sastava drva, razlikuju se makromolekularne tvari stanične stijenke kao što su celuloza, poliloze (hemiceluloza) i lignin, koji su prisutni u svim vrstama drva, te sporednih niskomolekularnih tvari kao što su akcesorne tvari, ekstraktivni materijal i mineralne stvari, koje su općenito vezane za neke vrste drva, slika 12 [9].



Slika 12. Shema ukupnog kemijskog sastava drva [9]



Drvo se najbolje može opisati kao trodimenzionalni biopolimerni kompozit sastavljen od međusobno umreženih lanaca celuloze, hemiceluloze i lignina te zanemarivog sadržaja ekstraktiva i anorganskih tvari. Većinska kemijska komponenta u živom drvu je voda, a suha drvna tvar tj. stanična stjenka, sastavljena je uglavnom od polimera – ugljikohidrata (65-75 %) u kombinaciji s ligninom (18-35 %).

Četinjače sadrže nešto više celuloze i lignina, a manje hemiceluloze od listača. Osim hemiceluloze i celuloze u drvu se, u zanemarivim količinama, mogu naći još dva ugljikohidratna spoja – škrob i pektin.

Na elementarnoj razini suha drvna tvar stanične stjenke sastoji se od ugljika (50 %), kisika (44%) i vodika (6 %) te anorganskih tvari u tragovima [2].

Celuloza je ugljikohidratni polimer, a može biti sastavljena od različitih jednostavnih ugljikohidrata. To je najrasprostranjeniji polisaharid i najrašireniji organski spoj na Zemlji. Celuloza sadrži jedinice  $\beta$ -D-glukopiranoze koje su tako povezane da tvore molekularni lanac. Prema tome, celuloza se može opisati kao linearno polimerni glukan s jednolikom strukturom lanca. Jedinice su međusobno povezane  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4)-glikozidnim vezama. Kao rezultat toga, linearni celulozni lanac je žilav i ravan u usporedbi s heličnom tvorevinom frakcije  $\alpha$ -vezane amilaze škroba [10].

Stupanj polimerizacije kod drvene celuloze je između 9 i 10 tisuća, a može biti i do 15 tisuća. To odgovara duljini od približno 5  $\mu$ m.

Četinjače sadrže između 40-45 % celuloze, a listače između 38 i 49 %.

Hemiceluloza je također ugljikohidratni polimer kao i celuloza, ali s puno manjim stupnjem polimerizacije, najčešće između 100 i 200. Obično je građena od različitih tipova monomernih šećera i za razliku od celuloze, hemiceluloza je razgranati polimer.

Detaljna struktura većine drvnih celuloza ne može se precizno determinirati.

Četinjače sadrže nešto manje hemiceluloze (7-14 %) od listača (19-26 %) [2].

Pektin, škrob i proteini su također ugljikohidratni polimeri koji se nalaze u drвноj tvari kako listača tako i četinjača.

Pektina ima u središnjoj lameli i u membrani graničnih pitova. U većoj koncentraciji nalazi se u staničnoj stijenci parenhimskih stanica unutarne kore.

Škrob je osnovni rezervni polisaharid u drvu, nalazi se u obliku granula, a može se naći i u staničnoj stijenci [1].

Lignin je treća velika komponenta stanične stijenke drva (20-40%) koja se nalazi u staničnoj stijenci i središnjoj lameli kao obložna tvar, slijedeći tvorbu polisaharida, a služi kao vezivo između drvnih vlakana.

Kemijska je i morfološka komponenta staničja viših biljaka, gdje izgrađuje provodno staničje specijalizirano za provod tekućine, nosilac je mehaničkih svojstava te na sebe prima sva statička i dinamička naprezanja koja se javljaju u drvu.

Lignini su amorfne trodimenzionalne mreže polimera fenilpropanskih jedinica s mnogo različitih kemijskih veza između monomera koji dovode do složene strukture koja se može objasniti samo učestalošću i rasprostranjenosti različitih veza [10].

Kod četinjača lignina može biti između 25 i 35 %, a kod listača između 18 i 25 %.

### 3. SVOJSTVA DRVA

Varijacija svojstva tj. rasipanje je uobičajeno za sve materijale, a ni drvo nije iznimka. Budući da je drvo prirodan materijal, ono je podvrgnuto nekolicini promijenjivih faktora kao što su vlaga, promjene u tlu, način rasta, starenje, itd. Stoga, svojstva drva se mogu znatno razlikovati čak i kad je u pitanju ista deblo.

Drvo se može opisati kao ortotropan materijal što znači da ima specifična i međusobno nezavisna svojstva u smjeru triju međusobno okomitih osi: longitudinalne, radijalne i tangencijalne osi. Longitudinalna os je paralelna smjeru vlakanaca, radijalna os je okomita na godove i okomita na smjer vlakanaca u radijalnom smjeru, a tangencijalna os je okomita na vlakanaca i tangira godove [11].

Jedan od najutjecajnijih faktora na svojstva drva je udio vlage u drvu.

#### 3.1. Udio vlage u drvu

Drvo kao materijal se formira u vodenom okruženju živog stabla, te drvene stanice ostaju u tom stanju sve dok tok vode iz korijenja nije prekinut (npr. sječom drveta). Drvo se tada počinje sušiti, rezultirajući promjenom različitih svojstava [12].

Ono je porozan i higroskopan materijal koji može upiti vlagu direktno iz atmosfere u tekućem stanju. Sadržaj vlage predstavlja količinu vode koja je adsorbirana u unutrašnjost drva ili prisutna kao tekućina u toj poroznoj strukturi. Udio vlage utječe na fizikalna svojstva kao što je gustoća (skupljanje ili širenje), električna, toplinska, akustična, mehanička i biološka svojstva [13].

Dakle, drvo ima svojstvo da mijenja svoj udio vlage u odnosu na vlagu u zraku. Ono se širi u vlažnoj okolini, a skuplja u suhoj. Drugim riječima, drvo bubri ili se skuplja ovisno o tome prima li ili otpušta vlagu, ovisno o smjeru. Omjeri za pojedine smjerove su: aksijalno : radijalno : tangencijalno = 1:10:20 [4].

U strukturi tek odsječenog stabla, udio vlage je prisutan u staničnoj šupljini kao slobodna voda, a unutar stanične stijenke kao vezana voda. Budući da je stablo izloženo atmosferskim uvjetima, ono će se početi sušiti, gubeći uglavnom slobodnu vodu. Stanje u kojem je sva slobodna voda izgubljena, a gdje je ostala sva vezana voda, zove se stanje zasićenosti vlakanaca. Ovo je vrlo važan proces budući da promjene u udjelu vlage ispod stanja

zasićenosti utječu na skoro sva svojstva drva. Povećanje udjela vlage od točke zasićenja prema gore nema tako veliki utjecaj [13].

Udio vlage je obično izražen preko mase osušenog drva, odnosno drva bez vode u sebi:

$$w = \{ (m_w - m_o) / m_o \} \times 100 [\%] \quad (1.1)$$

gdje je  $w$  udio vlage,  $m_w$  je masa vlažnog drva, a  $m_o$  je masa osušenog drva [13].

Drvo s 40 % vlage ima oko 2/3 vlačne čvrstoće i polovicu tlačne čvrstoće od drva s 10 % vlage. Ako je drvo suho ili stalno ispod vode, ono može dugo trajati. Vlažan zrak i izmjenjivanje suhoće i vlažnosti dovode do truljenja drva [4].

Sadržaj vlage drva za pojedine namjene može iznositi:

- građevinsko drvo oko 20 do 25 %
- stolarsko drvo oko 15 %
- drvo za namještaj oko 12 %
- drvo za parkete oko 8 %
- drvo za ploče od ukočenog drveta oko 6 % [4].

Tablica 1. prikazuje udio vlage ovisno o vrsti drva.

**Tablica 1. Vrijednosti udjela vlage ovisno o vrsti drva [11]**

Vrsta	Udio vlage $w$ (%)
Jasen, bijeli	24
Breza, žuta	27
Kesten, američki	24
Douglas-jela	24
Kukuta, zapadna	28
Ariš, zapadni	28
Bor, gusti	21
Bor, dugolisti	21
Bor, crveni	24
Smreka, crvena	27
Smreka, Sitka	27
Ariš, američki (Tamarack)	24

### 3.2. Mehanička svojstva

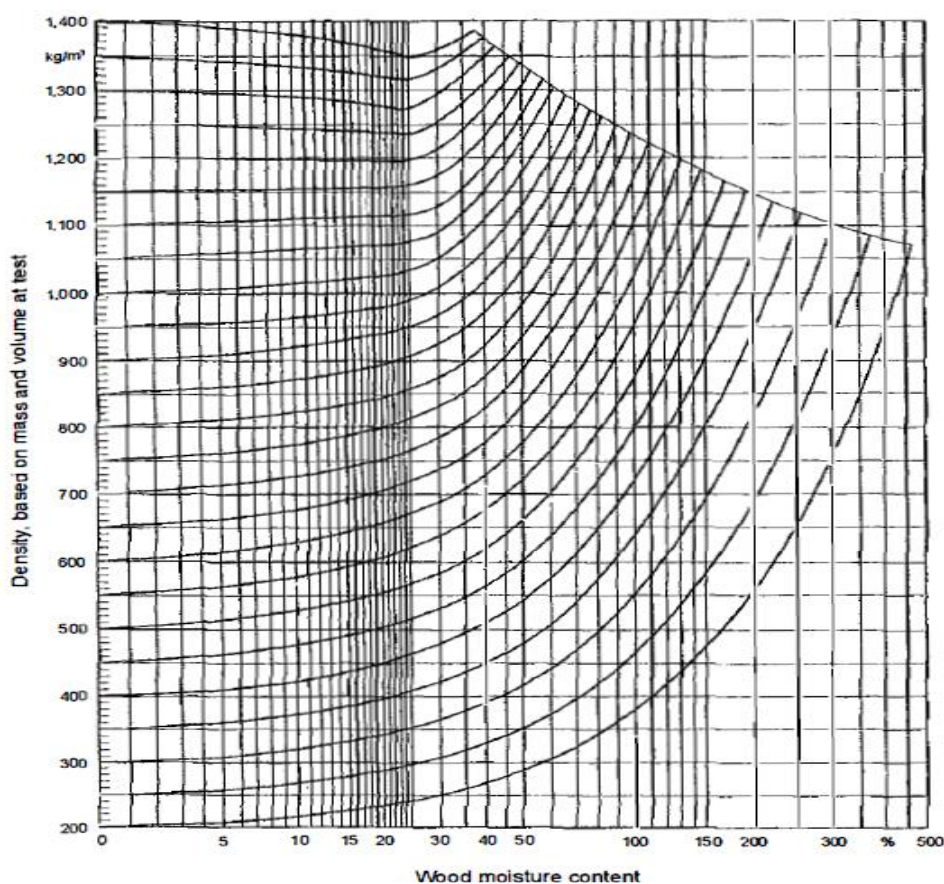
Kao što je spomenuto u ranijim poglavljima, svojstva drva uvelike ovise u njegovoj strukturi što uključuje smjer godova, smjer vlakana, vrstu drva, vlažnost, starost i mnoge druge podatke. Stoga, kod drva je često rasipanje svojstava, čak i kod istog ispitivanja, zbog njegove nepravilne i nehomogene građe. Ispitivanje mehaničkih svojstava je od ključne važnosti pri konstrukciji proizvoda od drva te njegovom ponašanju u eksploataciji. Iz tog razloga, potrebno je poznavati najutjecajnije parametre na mehanička svojstva drva kako bi se što lakše odabrao materijala za željeni proizvod.

Jedan od temeljnih takvih parametara je gustoća. Gustoća pojedine vrste drva ponajprije ovisi o debljini celulozne stanične stijenke u odnosu prema šupljini [4].

U stvarnosti postoji bliska povezanosti između gustoće i drugih svojstava kao što su mehaničkih svojstava, otpornost na abraziju, toplinske postojanosti i dr.

Budući da na gustoću znatno utječe i udio vlage, usporedbe gustoća su objektivno moguće jedino pri istom udjelu vlage. Standardne vrijednosti udjela vlage su između 0 i 12 %.

Gustoća se definira kao masa po jedinici volumena.



Slika 13. Dijagram ovisnosti udjela vlage o gustoći [13]

Najjednostavnija metoda određivanja gustoće drva je njegovo vaganje te mjerenje njegovog volumena. Ako je u pitanju uzorak pravilnih dimenzija i bez udubina, jednostavno je izmjeriti njegovu duljinu, širinu i debljinu, pa u konačnici izračunati i volumen. Za uzorke nepravilnih oblika, prikladnije je mjeriti gustoću metodom uranjanja [14].

Budući da na gustoću znatno utječe udio vlage, upijanje vlage će uzrokovati povećanje mase i volumena drva. Dijagram te veze između udjela vlage, mase i volumena tj. gustoće prikazan je na slici 13.

Osim gustoće za primjenu drva važna je i čvrstoća, pri čemu se razlikuje vlačna, tlačna i savojna čvrstoća.

U tablici 2. prikazani su podaci o nekim osnovnim svojstvima nekih vrsta drva. Zbog uspoređivanja su u tablici navedeni i podaci o svojstvima kompozita na bazi fenolne smole i drva, te tzv. "umjetnog drva" [4]. Podaci o čvrstoći odnose se na svojstva u uzdužnom smjeru.

**Tablica 2. Osnovna svojstva nekih svojstva drva [4]**

Vrsta drva	Gustoća, kg/m <sup>3</sup>	Čvrstoća, N/mm <sup>2</sup>		Primjena
		Tlak	Vlak	
Lipa, jela, omorika, bor	450 do 550	40 do 50	70 do 110	Građevinsko drvo
Orah, jabuka, kruška, bukva, hrast, javor	700 do 850	55 do 63	115 do 135	Visokogradnja, stolarija
Ebanovina	1230	105	-	Ležaji
Kompozit na bazi fenolne smole i drva	1200 do 1400	175	225	Zrakoplovstvo, autom. industrija
Umjetno drvo, prešano drvo	1100 do 1500	150	250	Termotehnika

### 3.2.1. Čvrstoća

Čvrstoća uvelike ovisi o smjeru vlakana. Prilikom opterećenja, u smjeru vlakana se postižu najviše, a okomito na taj smjer najmanje vrijednosti vlačne čvrstoće. Također, ona se smanjuje povišenjem sadržaja vlage, a povećava porastom gustoće.

Zbog izvijanja vlakana, tlačna čvrstoća iznosi samo oko polovice vlačne čvrstoće. Pri smičnom opterećenju očito je da će više vrijednosti biti dobivene za smjer opterećivanja koji je okomit na smjer vlakana.

Vlačna čvrstoća u smjeru vlakana približno je dvostruka u odnosu na tlačnu čvrstoću budući da vlakna pod istim opterećenjem zbog izvijanja pucaju. Čvrstoća je u smjeru okomitom na vlakna malog iznosa te približno iznosi 1/50 vlačne i 1/20 tlačne čvrstoće u smjeru osi vlakana. Usprkos tomu, drvo je uslijed povoljnog omjera čvrstoće prema gustoći omiljeni konstrukcijski materijal u građevinarstvu [4].

Tablica 3. prikazuje detaljnije podatke o gustoći i čvrstoći važnijih vrsta drva. Svojstva su mjerena za sušeno drvo na zraku pri udjelu vlage od 12 do 15 %.

**Tablica 3. Čvrstoća važnijih vrsta drva [4]**

Vrsta drva	Gustoća, kg/m <sup>3</sup>	Smjer s obzirom na vlakna	Čvrstoća, N/mm <sup>2</sup>			
			Vlak	Tlak	Savijanje	Smik
Brijest	500 do 850	=	60 do 120	30 do 60	50 do 160	7
		⊥	4	10	-	25
Bukva	500 do 900	=	60 do 180	40 do 80	60 do 180	5 do 20
		⊥	7	10	-	35
Grab	500 do 850	=	50 do 200	40 do 80	50 do 140	10
		⊥	6	10	-	30
Jasen	500 do 900	=	30 do 220	30 do 60	50 do 180	7
		⊥	7	10	-	-
Hrast	400 do 950	=	50 do 180	40 do 60	70 do 100	5 do 15
		⊥	5	10	-	30
Orah	600 do 750	=	100	40 do 70	80 do 140	-
		⊥	4	10	-	-
Bor	300 do 900	=	40 do 190	30 do 80	40 do 200	50 do 15
		⊥	3	10	-	20
Jela	300 do 700	=	50 do 120	30 do 50	40 do 100	5
		⊥	2	4	-	25
Smreka	300 do 700	=	40 do 240	30 do 70	40 do 120	5 do 10
		⊥	3	50 do 10	-	25

### 3.2.2. Modul elastičnosti

Youngov modul elastičnosti ili samo modul elastičnosti (MOE) predstavlja mjeru krutosti materijala i jednak je omjeru vlačnog naprezanja i linijske vlačne deformacije, u linearnom ili elastičnom dijelu dijagrama naprezanja.

Svojstvo elastičnosti podrazumijeva deformacije koje prestaju nakon što prestaje opterećenje na konstrukciju, a konstrukcija se vraća u početni oblik prije opterećenja. Kada iznos opterećenja dosegne više vrijednosti, može doći do trajne (plastične) deformacije [11].

Krutost materijala je važna veličina pri određivanju stabilnosti i sigurnosti neke konstrukcije. Youngov modul elastičnosti vrijedi i za tlačna naprezanja kod većine materijala.

Modul elastičnosti nam može poslužiti kao izračun produljenja ili suženja nekog materijala koji je pod utjecajem neke vanjske sile [15]. Što je viši iznos modula elastičnosti, veća je krutost odn. manja je elastičnost, što znači da materijal s većim iznosom modula može izdržati veće opterećenje, ali ako ono bude dovoljno veliko, doći će do trajne (plastične) deformacije.

Modul elastičnosti ovisi direktno o jačini veze između atoma i/ili molekula u kristalnoj rešetki ili amorfnoj strukturi materijala. Iz tog razloga najveći modul elastičnosti ima dijamant kod kojeg su atomi ugljika međusobno povezani jakim kovalentnim vezama [16].

Definiran je samo u rasponu u kojem je naprezanje proporcionalno deformaciji, a materijal se vraća u početno stanje nakon prestanka djelovanja vanjske sile. Kako se naprezanje povećava, Youngov modul više nije konstanta nego se smanjuje, a materijal ili teče, trajno se deformira ili se slomi.

S obzirom na izrazito usmjerenu građu drva, razlikuju se tri vrste modula elastičnosti, označene s  $E_L$ ,  $E_R$  i  $E_T$ , koji se odnose na module u longitudinalnom, radijalnom i tangencijalnom smjeru [11]. Vrijednosti modula elastičnosti u longitudinalnom smjeru su najviše i za neke vrste drva mogu biti i nekoliko desetaka puta veće od vrijednosti u druga dva smjera.

Modul elastičnosti je vrlo važan za drvo jer je općenito dobar pokazatelj njegove čvrstoće. Mjeri se obično u GPa (gigapaskalima) te se za njegova ispitivanja uglavnom podrazumijeva drvo s udjelom vlage oko 12 % [17].

Podaci o modulu elastičnosti bitnijih vrsta drva za 12 % vlage nalaze se u tablici 4.



**Tablica 4. Modul elastičnosti važnijih svojstva drva [18]**

<b>Vrsta</b>	<b>Modul elastičnosti <math>E</math> , GPa</b>
Jasen	10,1
Bukva	10,4
Breza	15,2
Brijest, Engleski	11,8
Brijest, Nizozemski	7,7
Douglas-jela	10,3 - 15,1
Mahagonij	8,7
Hrast	14,6
bor	8,6 – 10,3
Topola	7,2
Smreka, Norveška	7,4 – 8,6
Javor	9 – 13,5

Treba napomenuti da modul elastičnosti, kao i ostala svojstva drva, bitno ovise o gustoći ispitivane vrste drva te o smjeru u kojem je modul ispitivan. Jasno je da se zbog anizotropnosti i heterogenosti drva Youngov modul razlikuje među različitim vrstama drva, a može varirati čak i među stablima iste vrste drva pa i unutar istog debla.

Youngov modul se može ispitivati metodama s razaranjem ispitivanog uzorka ili bez njegovog razaranja. Kod razornih metoda, nakon ispitivanja uzorak promijeni svoja prvobitna svojstva, a kod nerazornih metoda, uzorak ostaje nepromijenjen. Od razornih ispitivanja, neke od mogućih metoda uključuju statičko vlačno ispitivanje na kidalici ili metodom savijanja u tri ili četiri točke. Među nerazornim ispitivanjima često se koriste metode ispitivanja ultrazvukom ili metode dinamičkog ispitivanja pobudom zvučnih valova [19].

S obzirom na primjenu različitih metoda ispitivanja, iznosi modula elastičnosti razlikuju se ovisno o metodi i uvjetima ispitivanja pa je moguće mjeriti statički i dinamički modul elastičnosti. Nekoliko autora vrlo značajnih članaka procjenjuju da su vrijednosti dinamičkog

modula elastičnosti za oko 10 % više od statičkog. Razliku između ove dvije vrste modula elastičnosti najbolje opisuje fenomen puzanja drva.

Odbijanje snopa vala pod opterećenjem se sastoji od sume elastičnog odbijanja i odbijanja prouzročenog puzanjem. U praksi se utjecaj puzanja obično zanemaruje, čak i kod dinamičkih ispitivanja [20].

Za određivanje Youngovog modula drva uglavnom se koristi statička metoda savijanjem, ali nedostatak te metode je često dugotrajna i skupa priprema ispitivanih uzoraka te njihovo razaranje. Takvo stanje je potaklo istraživanje brzih, jeftinih i isplativih nerezornih metoda (NDE) kao što su ultrazuk, metoda valnog pritiska (stress wave) te metoda ispitivanja vibracijom [21].

Najveći problem kod ispitivanja modula elastičnosti drva predstavlja činjenica da svaka metoda daje nešto drugačije rezultate. Stoga je od ključne važnosti interpretacija dobivenih rezultata. Dakle, optimalno rješenje je koristiti više različitih NDE metoda ispitivanja [22].

### 3.3. Akustična svojstva drva

Drvo je, zbog svoje nehomogene građe, gustoće i fleksibilnosti, vrlo povoljna opcija kao građevni materijal za razne situacije gdje utjecaj zvuka nije zanemariv. Bilo da se radi o glazbenim instrumentima ili koncertnim dvoranama, akustična svojstva drva se ističu u odnosu na druge materijale [23].

Ako se radi o glazbenim instrumentima, na svijetu postoji više od sto vrsta drva koje se koriste za konstrukciju puhačkih i žičanih instrumenata te udaraljki.

Razlog zbog kojeg se drvo toliko često primijenjuje za instrumente nisu samo njegova akustična svojstva već i jednostavna obrada te dostupnost materijala [24].

Akustična svojstva proizlaze iz strukture drva, točnije sustava stanica koji pretvara energiju zvuka u toplinsku energiju pomoću otpora trenja i vibracija. Unutarnje trenje u strukturi debla omogućuje drvu prigušenje zvuka više nego to čine drugi materijali. Na taj način će se zvuk u npr. betonskoj prostoriji odjekivati glasno i agresivno, a u drvenoj će ta jeka (engl. echo) biti puno kraćeg trajanja i općenito ugodnijeg karaktera ljudskom uhu [23].

Kao što je spomenuto u ranijim poglavljima, većina svojstva drva ovise o gustoći koja se s modulom elastičnosti ubraja u glavne čimbenike koji utječu na akustična svojstva. Tu se radi uglavnom o modulu elastičnosti i smičnom modulu u longitudinalnom smjeru odn. smjeru paralelnom pružanju vlaknaca gdje su iznosi tih modula najveći [24].

Još jedno bitno svojstvo drva, posebno kod glazbenih instrumenata, je prilagođavanje uvjetima okruženja u kojem se nalazi, točnije promjeni udjela vlage u zraku. Sva svojstva materijala bitna za primjenu u akustici kao što su gustoća, Youngov modul, prigušenje i skupljanje veoma ovise o udjelu vlage u drvu. Općenito, brzina sorpcije vlage u drvu se smanjuje porastom gustoće i udjela ekstrakata u drvu (smole, metalni ioni, terpentini).

Gustoća i Youngov modul te koeficijent gubitka imaju primarni utjecaj na akustično ponašanje jer o njima direktno ovisi brzina zvuka u materijalu i intenzitet prenesenog zvuka [24].

**3.3.1. Fizikalne veličine u akustici [24]**

Najvažniji fizikalni parametri kod odabira vrste materijala za zvučnu primjenu, kao što su glazbeni instrumenti ili unutarnja izolacija građevina, jesu brzina zvuka u materijalu, akustička impedancija, koeficijent radijacije zvuka i koeficijent gubitka.

Brzina zvuka ( $c$ ) kroz materijal definirana je Youngovim modulom ( $E$ ) i gustoćom materijala ( $\rho$ ), a računa se prema izrazu:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1.2)$$

Impedancija materijala ( $z$ ) je definirana kao produkt brzine zvuka materijala ( $c$ ) i njegove gustoće ( $\rho$ ), a računa se prema izrazu:

$$z = c\rho = \sqrt{E\rho} \quad (1.3)$$

Koeficijent radijacije zvuka u materijalu ( $R$ ) je definiran kao omjer brzine zvuka ( $c$ ) i gustoće materijala ( $\rho$ ). Računa se prema izrazu:

$$R = \frac{c}{\rho} \quad (1.4)$$

Koeficijent gubitka  $\eta$  pokazuje u kojoj mjeri materijal gubi energiju vibracije djelovanjem unutarnjeg trenja. Koeficijent gubitka ili stupanj prigušenja ovisi o faktoru kvalitete ( $Q$ ), logaritamskom smanjenju ( $\delta$ ) i kutu gubitka ( $\psi$ ). Sve navedene veličine povezane su izrazom:

$$\eta = \frac{1}{Q} = \frac{\delta}{\pi} = \tan\psi. \quad (1.5)$$

### 3.3.2. Brzina zvuka

Zvuk je mehanički val koji nastaje titranjem zvučnog izvora kao što je čvrsto tijelo, tekućina ili plin. Ako na drvo djeluju vibracije odnosno zvučni valovi, ono će početi rezonirati na određen način zbog svojih akustičnih karakteristika [25].

Kao što pokazuje jednačina 1.2, brzina zvuka direktno je povezana s modulom elastičnosti i gustoćom. Ona naravno ovisi i o vrsti drva te se razlikuje s obzirom na smjer vlakana. Youngov modul u radijalnom smjeru je samo 1/20 do 1/10 iznosa modula u longitudinalnom smjeru. Analogno tome, brzina zvuka u smjeru okomitom na smjer vlakana je otprilike 20 do 30 % njene vrijednosti u longitudinalnom smjeru.

Općenito, brzina zvuka u drvu smanjuje se povećanjem temperature ili sadržaja vlage proporcionalno utjecaju tih varijabli na modul elastičnosti i gustoću. Također, smanjuje se porastom frekvencije i amplitude vibracija [24].

Brzina širenja zvuka u zraku pri standardnom atmosferskom tlaku i temperaturi od 0 °C iznosi u prosjeku 331,8 m/s, a pri standardnom tlaku (1013,25 hPa ili 760 mm Hg) i sobnoj temperaturi iznosi u prosjeku 340 m/s. Brzina širenja zvuka u drvu je za otprilike 10 do 15 puta veća od širenja brzine zvuka u zraku [25].

Bitno je napomenuti da zdrava odrasla osoba čuje valove zvuka nastale mehaničkim titranjem frekvencijskog raspona 16 do 20 000 Hz (titraja u sekundi).

Brzina zvuka je veoma važna kao akustičko svojstvo za primjenu kod glazbenih instrumenata jer uvjetuje prijenos zvučnih valova s glazbala koje ima vlastitu impedanciju na zrak, koji ima drugačiju impedanciju, budući da taj zvuk dolazi do ljudskog uha putem zraka.

Tablica 5. prikazuje brzinu zvuka za neke vrste drva i druge materijale.

**Tablica 5. Brzina zvuka za neke vrste materijala [25]**

Vrsta drva/materijala	Gustoća g/cm <sup>3</sup>	Brzina zvuka m/s
Bor	0,50	4900
Cedar	0,55	4400
Jela	0,40	5200
Jela, kompr. drvo	0,45	4180
Smreka	0,43	4840
Bukva	0,70	3412
Hrast	0,65	3380...4310
Jasen	0,65	3900
Javor	0,62	4100
Orah	0,55	4700
Topola	0,44	4280
Zrak, atm. tlak, 0°C	-	331,8
Voda	1,00	1450
Aluminij	2,75	5100
Bakar	8,90	3900
Olovo	11,34	1320
Željezo	7,85	5000
Pluto	0,25	430...530
Ebonit	1,15	1570
Staklo	2,50	5100...6000
Beton	2,40	3700
Opeka	1,80	2325

Provodnost zvuka važna je i u praksi jer se može upotrijebiti za procjenu zdravlja i kvalitete drva.

Gustoća drva iznosi tek 1/20 do 1/10 gustoće metala. Stoga, otpor zvuka (impedancija), koji je ključan za brzinu zvuka, a posebice za njegovu refleksiju, znatno se razlikuje kod drva i metala. Budući da je otpor prolasku zvuka proporcionalan gustoći, što opisuje jednadžba 1.3, metal će imati veći otpor prolasku zvuka pa će se zvuk teže širiti kroz materijal odnosno metal će pokazivat veće prigušenje zvuka nego drvo, što je vidljivo u jednadžbi 1.6 [25].

$$\vartheta = \frac{1}{\rho} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1.6)$$

Prigušenje zvuka ( $\vartheta$ ) je obrnuto proporcionalno gustoći, a proporcionalno je Youngovom modulu. Prigušivanjem zvuka nastaje toplinska energija zbog unutrnjeg trenja i ta veličina se naziva kapacitet prigušivanja [25].

Slika 15. prikazuje tijek smanjenja vibracija zvuka, gdje su:

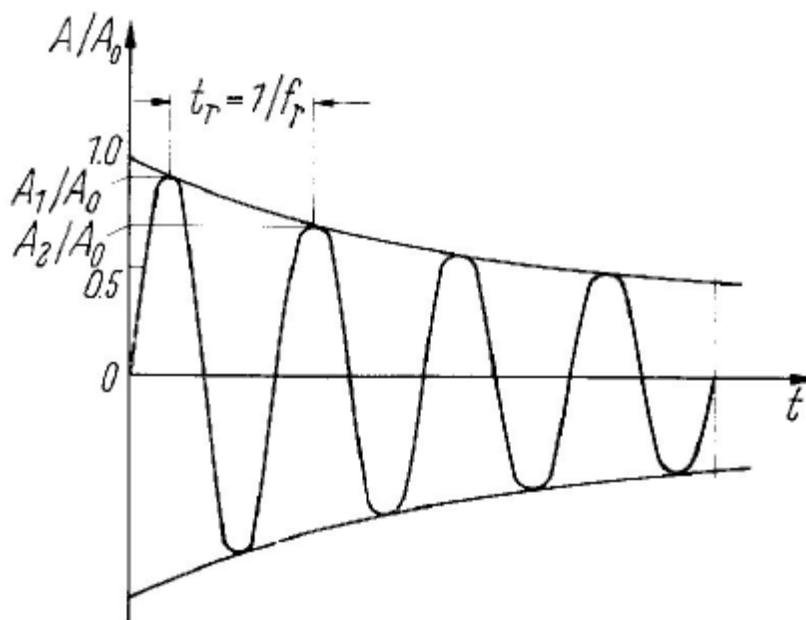
$t$  = vrijeme

$t_r$  = period

$f_r$  = rezonantna frekvencija

$A$  = amplituda frekvencije u vremenu  $t$

$A_0$  = amplituda frekvencije u vremenu  $t = 0$



Slika 14. Dijagram prigušenja vibracija zvuka [25]

Za brzinu prigušenja kao i za unutarnje trenje karakteristično je logaritamsko smanjenje, a ono ne ovisi o gustoći drva već je funkcija udjela vlage u drvu. Prigušivanje zbog radijacije zvuka u drvu je relativno visoko zbog njegovog odnosa brzine širenja zvuka i gustoće drva [25].

Kod gradnje glazbenih instrumenata poželjno je nisko prigušivanje unutarnjim trenjem, a visoko prigušivanje radijacijom zvuka [25].

### 3.4. Primjena drva u glazbenim instrumentima

Drvo je jedinstven i nezamjenjiv materijal za gradnju glazbenih instrumenata zbog svoje nepravilne strukture odn. posebnog načina rezoniranja te lake dostupnosti. Kod gradnje violina starih talijanskih stručnjaka (Amati, Guarneri i Stradivari), drvo je doseglo najviši stupanj prerade i oplemenjivanja [25].

Rezonancija je pojava pobuđivanja nekog fizikalnog sustava vanjskim vibracijama zvuka pri čemu mogu nastati vrlo intenzivne oscilacije ako se neke od tih vibracija podudaraju s vlastitim zvučnim frekvencijama tog sustava.

Ako na drvo djeluje spektar vibracija različitih frekvencija, ono počinje oscilirati u ritmu svih vibracija, ali je amplituda tih oscilacija mala. Ako je frekvencija pobude jednaka karakterističnoj frekvenciji drva, amplituda osciliranja će biti maksimalna te dolazi do pojave rezonancije [25].

Sposobnost rezonancije drva posebno je važno kod gradnje gudačkih instrumenata te se može opisati akustičnom konstantom drva ( $k$ ), jednadžba 1.7 [25].

$$k = \sqrt{\frac{E}{\rho^3}} \quad (1.7)$$

gdje je  $E$  = dinamički modul elastičnosti

$\rho$  = gustoća drva.

Kod nekih glazbenih instrumenta drvo je važno zbog provođenja zvuka tj. rezonancije. To su gudački glazbeni instrumenti (violine, viole, violončela i kontrabasi), žičani instrumenti koji se sviraju prstima ili trzalicom (harfa, gitara, madolina, citra i razne tamburice), instrumenti s tipkama koji proizvode zvuk mehaničim udaranjem batića (klaviri, čembala).

Na slikama od 15. do 18. se nalaze neki od instrumenata ove skupine [25].





**Slika 15. Gudački instrumenti [26]**



**Slika 16. Harfa [27]**



Slika 17. Gitara [28]



Slika 18. Čembalo [29]

Druga skupina glazbenih instrumenata koji su isključivo drveni su puhački instrumenti (aerofoni) koji se sviraju posebnim jezičcem (piskom), a zvuk nastaje prolaskom zraka kroz cijev instrumenta (flaute, oboe, klarineti, fagoti i engleski rogovi). Za neke od tih instrumenata danas se koriste i metali (falute i saksofoni). Slike 20. i 21. prikazuju neke puhačke instrumente (oboa i fagot).



**Slika 19. Oboa [30]**



**Slika 20. Fagot [31]**

Treća skupina instrumenata gdje se drvo učestalo koristi uključuje razne udaraljke koje se dijele na idiofone (udaraljke definirane tonske visine) i membranofone (udaraljke nedefinirane tonske visine).

Na slikama 22. i 23. nalazi se neki od tih instrumenta.



**Slika 21. Vibrafon (idiofon) [32]**



**Slika 22. Set bubnjeva s činelama (membranofoni)**

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

### 4.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja

Cilj rada je odrediti brzinu širenja zvuka kroz drvo u longitudinalnom smjeru. Brzina zvuka kod svih materijala, a tako i kod drva, ovisi o dinamičkom modulu elastičnosti i gustoći materijala. Uz određena ograničenja, brzina širenja zvuka može se odrediti i iz podataka za statički modul elastičnosti.

U radu su provedena ispitivanja na dvije vrste drva: brijestu i hrastu lužnjaku. Gustoća uzoraka je određena standardnom metodom, a ispitivanje modula elastičnosti provedeno je u metodom savijanja u tri točke.

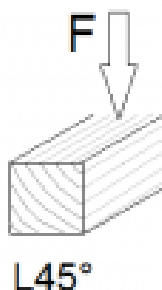
### 4.2. Materijal za ispitivanje

Uzorci za ispitivanje savojnog modula elastičnosti su izrezani iz obje vrste drva u longitudinalnom smjeru, paralelno s uzdužnom osi drva. Za svaku vrstu drva pripremljeno je 20 uzoraka. Svi uzorci uzeti su iz vanjskog dijela srževine, gdje je bila najmanja zakrivljenost godova. S obzirom da savojni modul elastičnosti u longitudinalnom smjeru ovisi o kutu između savojne sile i linije godova, pazilo se da svi uzorci budu izrezani na isti način, tako da spomenuti kut iznosi  $45^\circ$ .

Na uzorcima nije bilo vidljivih grešaka niti nepravilnosti u strukturi. Srednja širina goda, na području iz kojeg su izrezani uzorci, iznosila je 2,1 mm za hrast i 1,05 mm za brijest.

Uzorci su izrezani na dimenzije  $6 \times 6 \times 80$  mm.

Na slici 24. je prikazan položaj godova u odnosu na savojnu silu.



Slika 23. Položaj godova u odnosu na savjonu silu [1]

### 4.3. Određivanje gustoće i udjela vlage

Prema normi ISO 13061 [33] gustoća uzoraka i udio vlage određuje se neposredno nakon ispitivanja savojnog modula elastičnosti. Za ispitivanje su korišteni uzorci dimenzija 30×30×20 mm, a na poprečnom presjeku uzorka treba biti minimalno 5 godova.

Pri određivanju gustoće, volumen se mjeri s točnošću od 0,01 cm<sup>3</sup>, a masa s preciznošću ± 0,2 % ili manje.

Gustoća drva pri nekom udjelu vlage ( $\rho_w$ ) izračunata je prema jednadžbi 8:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} = \frac{m_w}{a_w \cdot b_w \cdot L_w} \quad (1.8)$$

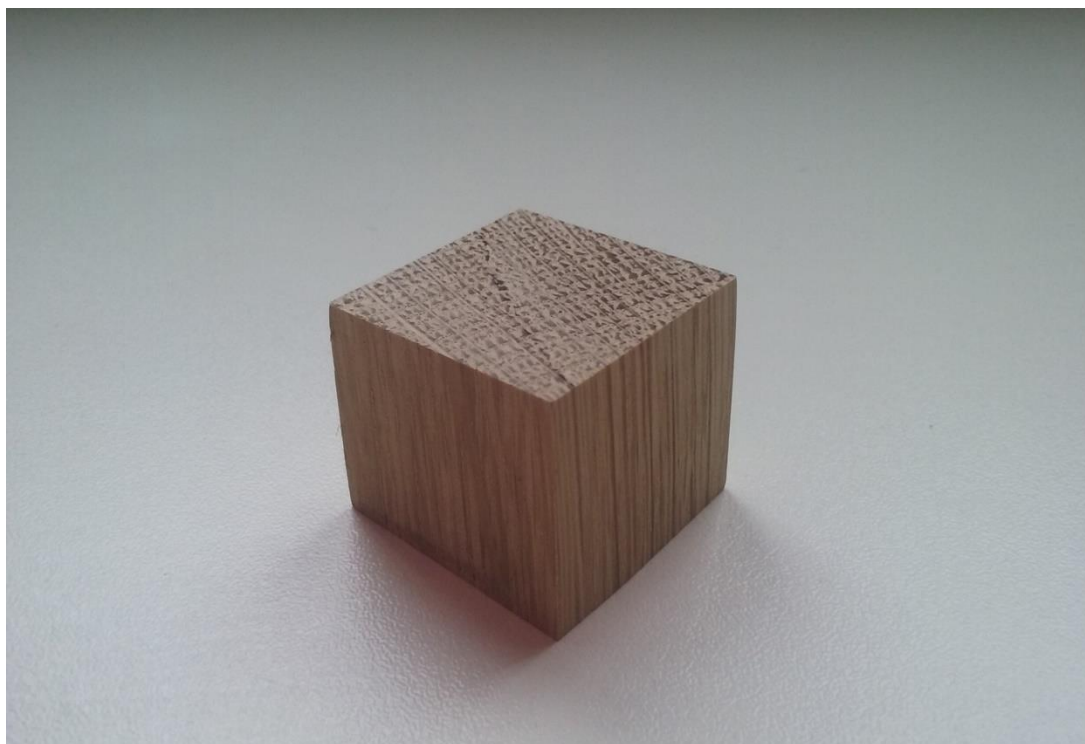
gdje je  $m_w$  masa drva pri nekom udjelu vlage, a  $V_w$  volumen drva dobiven iz dimenzija uzoraka širine  $a_w$ , visine  $b_w$  te duljine  $L_w$ .

Na slici 24. i 25. prikazani su uzorci hrasta i brijesta na kojima je izmjerena gustoća.



Slika 24. Uzorak drva brijesta za ispitivanje gustoće





**Slika 25. Uzorak hrasta lužnjaka za ispitivanje gustoće**

Sadržaj vlage u uzorcima je izračunat preko gubitka njihove mase sušenjem do konstantne mase pri temperaturi  $103 \pm 2^\circ\text{C}$ , prema normi ISO 13061-1. Konstanta masa podrazumijeva da nema promjene u masi veće od 0,2 % nakon dva uzastopna vaganja odnosno nakon osam sati sušenja.

Udio vlage ( $w$ ) izražen u postotcima (%) izračunat je prema jednadžbi 9:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (1.9)$$

gdje je  $m_1$  masa prije sušenja uzoraka, a  $m_2$  masa nakon sušenja.

U tablici 6. navedeni su rezultati mjerenja udjela vlage i gustoće izračunate pri istom tom udjelu vlage.

**Tablica 6. Gustoća i udio vlage uzoraka**

	Gustoća $\text{g/cm}^3$	Udio vlage %
Brijest	0,532	7,50
Hrast	0,759	7,22

Dobiveni rezultati koristit će se za određivanje brzine širenja zvuka.

Nakon što je izračunat udio vlage, moguće je odrediti gustoću za udio vlage od 12 %.

Ta gustoća se računa prema izrazu:

$$\rho_{12} = \rho_w \frac{1+0,01(12-w)}{1+0,01(12-w)\frac{\rho_w}{\rho_{H_2O}}} \quad (1.10)$$

Gdje je  $\rho_w$  gustoća drva pri nekom udjelu vlage,

w je udio vlage,

$\rho_{H_2O}$  je gustoća vode i iznosi 1 g/cm<sup>3</sup>.



#### 4.4. Ispitivanje savojnog modula elastičnosti uzoraka

Kako nije bilo moguće ispitati dinamički modul elastičnosti za određivanje brzine zvuka koristili su se rezultati dobiveni pri ispitivanju statičkog modula elastičnosti. Iz literature je poznato da postoji jasna relacija između statičkog i dinamičkog modula elastičnosti, pa se ta činjenica koristila u ovom radu [20].

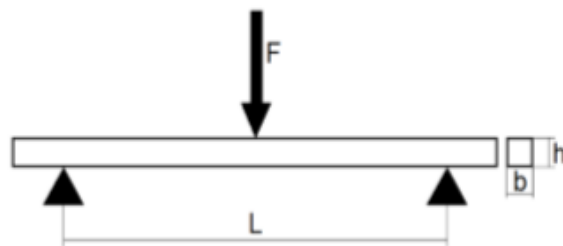
Ispitivanje savojnog modula elastičnosti provedeno je na uzorcima dimenzija  $6 \times 6 \times 80$  mm metodom savijanja u tri točke na kidalici MESSPHYSIK BETA 50-5 koja je prikazana na slici 26. Metoda je shematski prikazana na slici 27, a uzorak na kidalici prije opterećenja nalazi se na slici 28. Tijekom ispitivanja mjeren je progib pomoću video ekstenzometra ME 46, MESSPHYSIK te savojna sila.

Ispitivanja su provedena u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Za svaku vrstu drva ispitano je po 20 uzoraka. Kao što prikazuje slika 24., kod obje grupe grupe uzoraka sila opterećenja je bila pod kutem od  $45^\circ$  u odnosu na liniju goda. Razmak između oslonaca bio je 74 mm, promjer valjka i valjkastih oslonaca kojim se opterećuju uzorci iznosio je 10 mm, sila opterećenja iznosa 6,3 kN te konstantna brzina opterećivanja od 2,8 mm/min. Temperatura okoline za vrijeme mjerenja je bila  $22^\circ\text{C}$ , a relativna vlažnost zraka iznosila je 48 %. Svaki uzorak ispitivao se posebno, do trenutka loma.



Slika 26. Kidalica MESSPHYSIK BETA 50-5 u laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku



Slika 27. Metoda savijanja u tri točke [1]



Slika 28. Ispitni uzorak na kidalici neposredno prije opterećivanja

Vrijednost modula elastičnosti računa se prema izrazu:

$$E = \frac{L^3 (F_2 - F_1)}{4bt^3(a_2 - a_1)}, \text{ N/mm}^2$$

gdje je:

$L$  – razmak između oslonaca u mm

$b$  – širina uzorka u mm

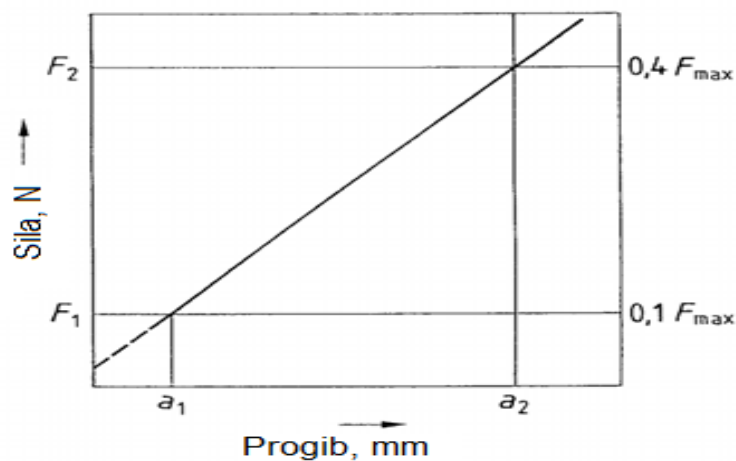
$h$  – visina uzorka u mm

$F_2 - F_1$  - prirast sile u području gdje je ovisnost sila-progib linearna

$$F_1 \approx 0,1F_{\max} \text{ i } F_2 \approx 0,4F_{\max}$$

$F_{\max}$  – maksimalna sila u N

$a_2 - a_1$  – prirast progiba (odgovara razlici  $F_2 - F_1$ ), slika 29.



Slika 29. Određivanje modula elastičnosti metodom savijanja u tri točke

#### 4.4.1. Rezultati ispitivanja savojnog modula elastičnosti za brijest

Na slici 30. prikazani su uzorci drva brijesta nakon provedenog ispitivanja. Rezultati ispitivanja savojnog modula elastičnosti prikazani su u tablici 7., a u tablici 8. navedene oznake i nazivi veličina s pripadajućim mjernim jedinicama.



Slika 30. Uzorci brijesta nakon ispitivanja

**Tablica 7. Rezultati ispitivanja uzoraka brijesta**

Test No	Fmax N	$\sigma_f M$ MPa	smax mm	Ef GPa	dFM mm	$\epsilon_f M$ %
1	248,3	115,1	4,674	10,19	3,811	3,216
2	219,5	103,1	4,054	9,88	3,270	2,750
3	191,3	95,58	3,703	7,93	3,163	2,463
4	207,4	112,0	3,841	10,69	3,293	2,445
5	183,8	99,62	4,046	9,19	3,502	2,589
6	179,7	98,46	4,028	8,29	3,417	2,595
7	216,9	109,3	3,491	10,65	2,875	2,333
8	187,4	96,46	3,887	9,33	3,924	2,556
9	191,5	104,9	3,971	10,07	3,351	2,532
10	183,1	101,2	3,442	9,01	3,001	2,206
11	212,3	106,6	4,321	7,65	3,859	2,855
12	165,5	87,28	4,318	7,73	3,619	2,867
13	214,1	107,1	3,537	10,27	2,981	2,341
14	227,9	106,4	4,399	8,47	3,705	3,012
15	203,4	102,0	3,770	9,12	3,294	2,474
16	237,2	118,3	4,510	11,20	3,747	2,965
17	205,0	109,8	4,421	9,95	3,841	2,819
18	187,1	94,59	4,366	7,73	3,673	2,870
19	181,7	91,41	4,163	7,25	3,590	2,727
20	173,7	92,32	4,080	8,16	3,499	2,642
Mean:	200,8	102,576	4,051	9,14	3,471	2,663
St.dev.:	22,05	8,237	0,351	1,188	0,312	0,258

Tablica 8. Oznake veličina i mjernih jedinica

OZNAKA VELIČINE	NAZIV VELIČINE	MJERNA JEDINICA
Test no	Redni broj ispitivanja	—
Fmax	Maksimalna sila	N
$\sigma_f M$	Savojna čvrstoća	MPa
smax	Maksimalni progib grede	mm
Ef	Modul elastičnosti	GPa
dFM	Prosječni progib grede	mm
$\epsilon_f M$	Istezljivost	%
Mean	Aritmetička sredina	—
St.dev.	Standardno odstupanje	—

Iz podataka za statički modul elastičnosti iz tablice 7. izračunate su vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti. Prema literaturi [20], vrijednosti Youngovog modula dobivenog dinamičkim metodama ispitivanja ( $E_{fd}$ ) su za 10% veće od statičkog. S tim vrijednostima i vrijednostima za gustoću iz tablice 6., izračunate su vrijednosti za brzinu zvuka, prema jednadžbi 1.2. Gustoća je jednaka za svaki uzorak i iznosi 0,532 g/cm<sup>3</sup>.

U tablici 9. prikazani su podaci za brzinu zvuka i vrijednosti statičkog i dinamičkog modula elastičnosti.

**Tablica 9. Vrijednosti za statički i dinamički modul elastičnosti te brzinu zvuka**

Test No	$E_f$ GPa	$E_{fd}$ GPa	$c$ m/s
1	10,19	11,21	4588,64
2	9,88	10,87	4517,90
3	7,93	8,73	4048,68
4	10,69	11,76	4699,66
5	9,19	10,11	4358,12
6	8,29	9,12	4138,38
7	10,65	11,72	4690,86
8	9,33	10,26	4390,33
9	10,07	11,08	4561,34
10	9,01	9,91	4313,50
11	7,65	8,41	3975,41
12	7,73	8,50	3996,38
13	10,27	11,30	4606,41
14	8,47	9,32	4184,20
15	9,12	10,03	4295,91
16	11,20	12,32	4810,46
17	9,95	10,95	4535,11
18	7,73	8,50	3995,68
19	7,25	7,97	3869,83
20	8,16	8,98	4106,03
Mean:	9,14	10,05	4334,14
St.dev.:	1,188	1,307	283,330

**4.4.2. Rezultati ispitivanja hrasta lužnjaka**

Na slici 31. prikazani su uzorci drva hrasta lužnjaka nakon provedenog ispitivanja. Kao i kod brijesta, ispitano je 20 uzoraka kod kojih je smjer savojne sile u odnosu na liniju godova bio pod kutem od 45 stupnjeva.



**Slika 31. Uzorci hrasta lužnjaka nakon ispitivanja na kidalici**

Analogno uzorcima drva brijesta, na tablici 10. prikazani su rezultati ispitivanja uzoraka hrasta lužnjaka.

**Tablica 10. Rezultati ispitivanja uzoraka hrasta lužnjaka**

Test No	Fmax N	$\sigma_f M$ MPa	smax mm	Ef GPa	dFM mm	$\epsilon_f M$ %
1	309,3	168,5	2,841	16,98	2,444	1,796
2	290,1	164,4	2,695	14,69	2,448	1,751
3	320,8	167,6	2,998	15,13	2,626	1,974
4	296,3	166,9	2,955	15,59	2,616	1,868
5	291,8	183,3	3,002	16,58	2,642	1,819
6	308,9	185,2	3,063	18,20	2,681	1,896
7	344,2	182,9	3,291	16,69	2,877	2,146
8	291,5	176,0	3,159	16,10	2,813	1,959
9	300,8	172,9	3,089	14,93	2,722	1,967
10	309,8	188,8	2,927	18,26	2,626	1,841
11	312,4	168,7	3,218	15,36	2,846	2,116
12	326,1	166,4	2,571	15,90	2,297	1,696
13	310,5	173,8	3,410	16,38	2,943	2,145
14	321,3	156,6	2,952	13,48	2,498	1,976
15	332,4	175,2	3,035	16,82	2,635	1,956
16	311,2	181,7	3,380	15,60	3,081	2,133
17	338,8	173,0	3,190	15,89	2,826	2,111
18	245,7	158,7	3,298	13,23	2,811	2,024
19	348,9	176,0	3,259	15,18	2,810	2,157
20	321,3	164,3	2,849	15,30	2,560	1,882
Mean:	311,61	172,55	3,06	15,81	2,69	1,96
St.dev.:	23,03	8,80	0,22	1,29	0,19	0,14



Iznosi statičkog modula elastičnosti iz tablice 10. se preračunavaju u dinamički modul (dinamički modul je iznosom oko 10 % veći) koji se s gustoćom iz jednadžbe 1.10 uvrštava u jednažbu 1.2, pa je tako izračunata brzina zvuka za drvo hrast. Gustoća se ponovo ne mijenja. Tablica 11. prikazuje statički i dinamički modul elastičnosti te brzinu zvuka za uzorke hrasta.

**Tablica 11. Vrijednosti za statički i dinamički modul elastičnosti te brzinu zvuka hrasta**

Test No	$E_f$ GPa	$E_{fd}$ GPa	$c$ m/s
1	16,98	18,68	4960,98
2	14,69	16,16	4614,24
3	15,13	16,64	4682,26
4	15,59	17,15	4753,47
5	16,58	18,24	4902,21
6	18,20	20,02	5135,84
7	16,69	18,36	4918,30
8	16,10	17,71	4830,46
9	14,93	16,42	4651,21
10	18,26	20,09	5144,81
11	15,36	16,90	4718,70
12	15,90	17,49	4800,36
13	16,38	18,02	4872,55
14	13,48	14,83	4420,28
15	16,82	18,50	4910,20
16	15,60	17,16	4754,86
17	15,89	17,48	4798,99
18	13,23	14,55	4378,35
19	15,18	16,70	4690,70
20	15,30	16,83	4708,92
Mean:	15,81	17,39	4782,38
St.dev.:	1,29	1,42	194,36

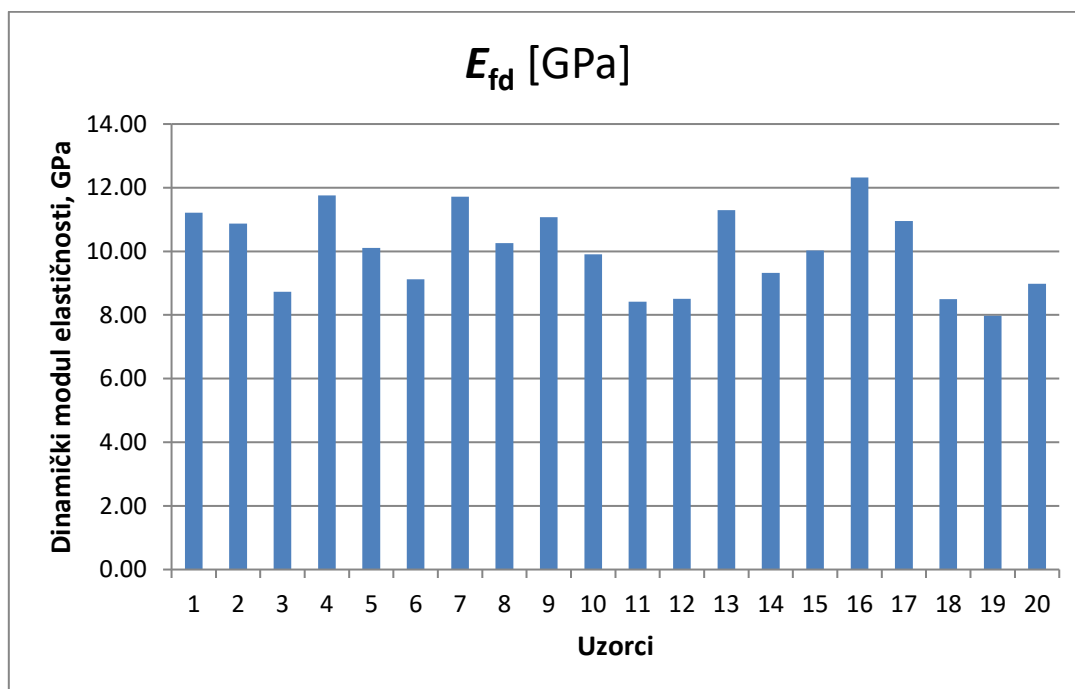
#### 4.5. Analiza rezultata

Na slici 32. nalaze se vrijednosti za dinamički modul elastičnosti za uzorke brijesta, izračunat prema navodima iz literature [20].

Srednja vrijednost dinamičkog modula elastičnosti iznosi 10,052 MPa.

Najmanja dobivena vrijednost je 7,973 MPa, a najveća 12,320 MPa.

Standardna devijacija ima vrijednost 1,307.



Slika 32. Vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti uzoraka brijesta

Na slici 33. nalaze se izračunate vrijednosti za dinamički modul elastičnosti za uzorke hrasta.

Srednja vrijednost dinamičkog modula elastičnosti iznosi 17,39 MPa.

Najmanja dobivena vrijednost je 14,55 MPa, a najveća 20,09 MPa.

Standardna devijacija ima vrijednost 1,42.

Vrijednosti brzine širenja zvuka za oba uzorka izračunate su prema izrazu (1.2).

Na slici 34. prikazane su vrijednosti brzine zvuka za svih 20 uzoraka brijesta.

Srednja vrijednost svih mjerenja iznosi 4334,14 m/s.

Najmanja vrijednost brzine zvuka iznosi 3869,83 m/s, a najveća 4669,66 m/s.

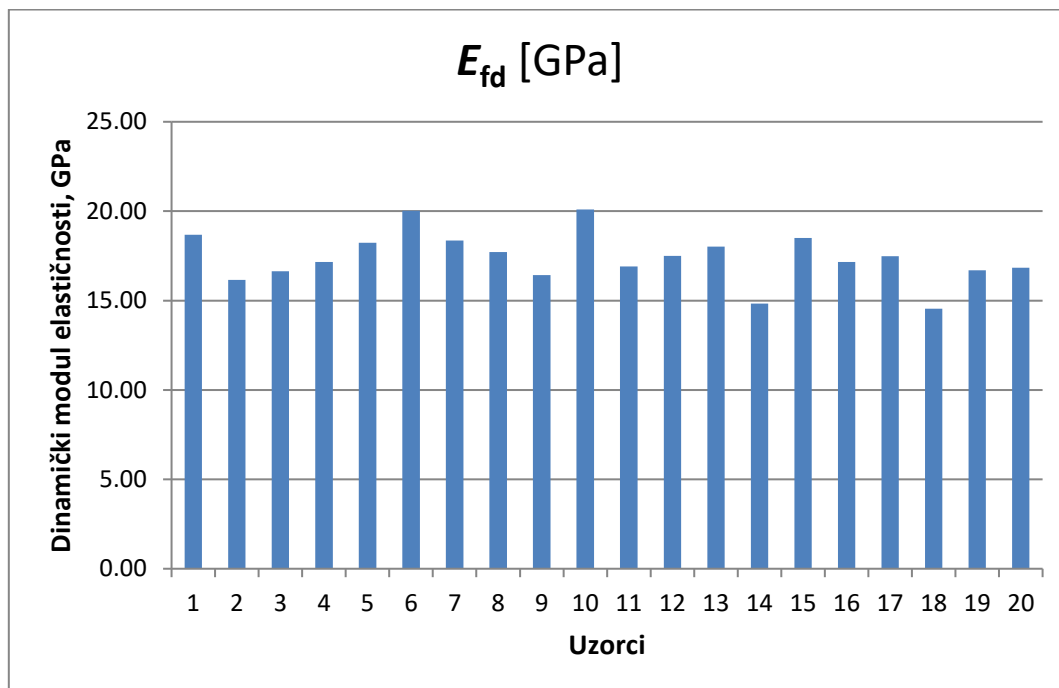
Standardna devijacija iznosi 283,33.

Na slici 35. prikazane su vrijednosti brzine zvuka za svih 20 uzoraka hrasta.

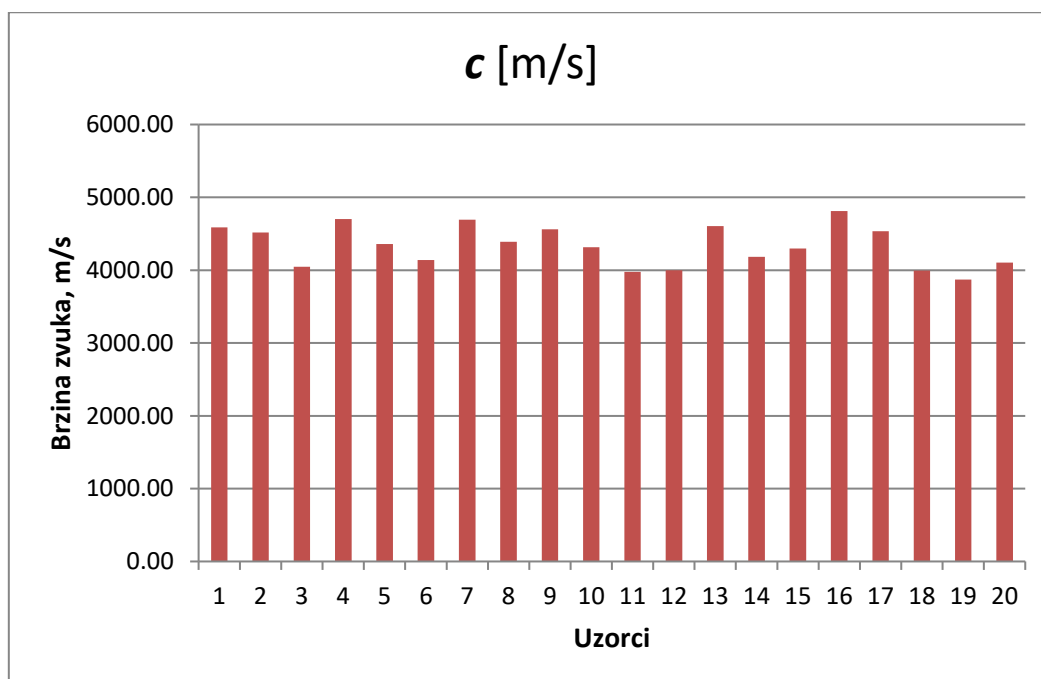
Srednja vrijednost brzine zvuka iznosi 4782,38 m/s.

Najviša vrijednost brzine zvuka iznosi 5144,81 m/s, a najmanja 4420,28 m/s.

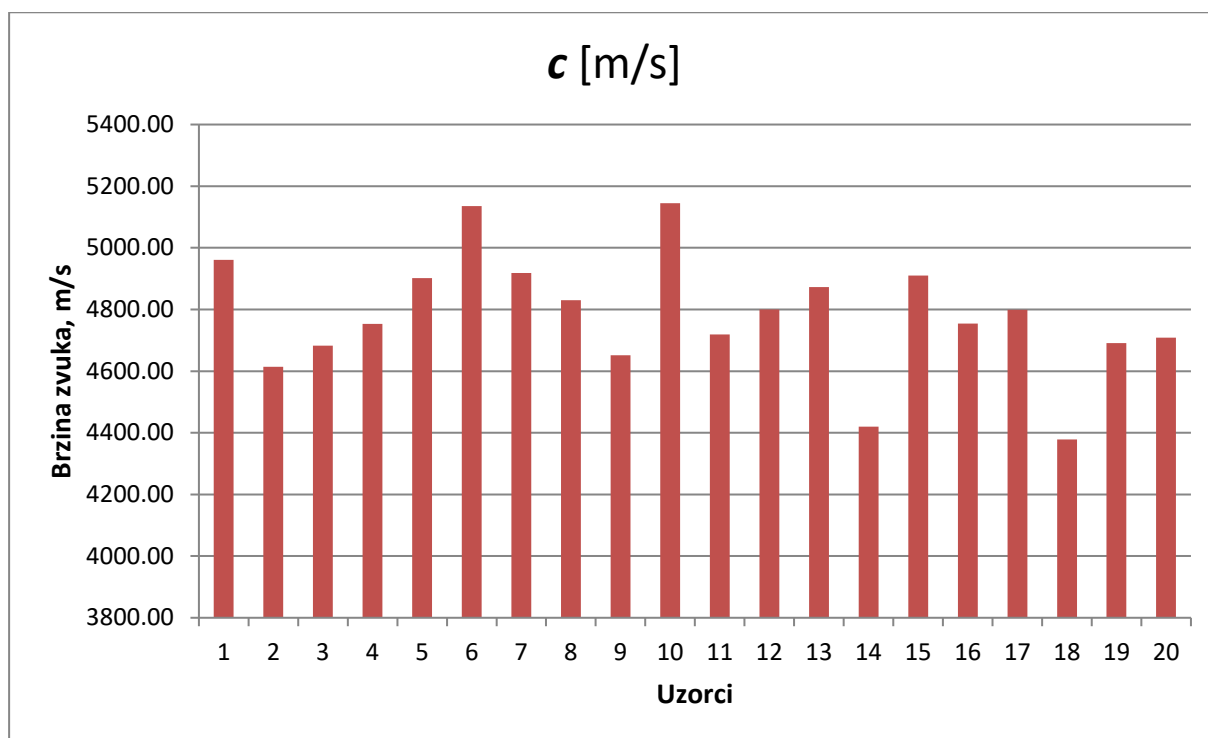
Standardna devijacija je 194,36.



Slika 33. Vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti uzoraka hrasta



Slika 34. Vrijednosti brzine zvuka za uzorke brijesta



Slika 35. Vrijednosti brzine zvuka za uzorke drva hrasta

Brzina zvuka ovisi o dinamičkom modulu elastičnosti, ali i o gustoći drva. Srednja vrijednost dinamičkog modula elastičnosti za hrast je 73 % veća od one za brijest. Vrijednost gustoće hrasta je 42,7 % veća od gustoće brijesta. Brzina širenja zvuka kroz hrast veća je za 10,3 % od brzine zvuka kroz brijest. Prirast dinamičkog modula elastičnosti i prirast gustoće nije linearan s prirastom brzine zvuka. Iako su gustoća, a pogotovo modul elastičnosti hrasta puno viši od istih veličina za brijest, brzina zvuka je neznatno viša.

Prema svemu navedenom vidi se da što je veći omjer između dinamičkog modula elastičnosti i gustoće, brzina širenja zvuka je veća.

## 5. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja i pritom dobivenih rezultata, može se zaključiti sljedeće:

- Brzina širenja zvuka je jedno od važnijih akustičnih svojstava drva, koja osobito dolazi do izražaja pri izradi glazbenih instrumenata, različitih vrsta izolacije i sl.
- Brzina širenja zvuka svih tehničkih materijala ovisi o vrijednosti modula elastičnosti i gustoći.
- Kako je vrijednost modula elastičnosti drva ovisna o usmjerenosti građe, sva ispitivanja su provedena u longitudinalnom smjeru, gdje je vrijednost modula elastičnosti najviša.
- S obzirom da postoji čvrsta korelacija između dinamičkog i statičkog modula elastičnosti, brzina širenja zvuka izračunata je na temelju podataka dobivenih ispitivanjem statičkog modula elastičnosti.
- Za potrebe ispitivanja, izmjerene su vrijednosti modula elastičnosti i gustoće na dvije vrste drva - hrastu i brijestu. Hrast ima viši dinamički modul elastičnosti (17,39 GPa) od brijesta (10,05 GPa). Gustoća hrasta ( $0,759 \text{ g/cm}^3$ ) je također viša od gustoće brijesta ( $0,532 \text{ g/cm}^3$ ). Rasipanje rezultata za modul elastičnosti je veliko za obje vrste drva, pogotovo kod uzoraka hrasta.
- Iako je modul elastičnosti hrasta za 73 % viši od modula elastičnosti za brijest, a gustoća viša za 43 %, brzina širenja zvuka kod hrasta je viša, ali samo za  $\approx 10 \%$ .

## LITERATURA

- [1] Rede, V.: *Drvo- tehnički materijal*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [2] Rowell, R. M.: *Handbook of wood chemistry and wood composites*, CRC Press, 2005.
- [3] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Drvo\\_\(materijal\)](https://hr.wikipedia.org/wiki/Drvo_(materijal)) Pogledano 20.09.2018.
- [4] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: *Svojstva i primjena materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [5] <https://hr.wikipedia.org/wiki/God> Pogledano 22.09.2018.
- [6] <http://slavonski-hrast.com/novosti/spacvanski-bazen-najveca-suma-hrasta-u-europi/> Pogledano 22.09.2018.
- [7] Pakkanen, H.: *Characterization of Organic Material Dissolved during Alkaline Pulping of Wood and Non-wood Feedstocks*, Finland, 2012.
- [8] <https://steurh.home.xs4all.nl/engloof/elooft.html#grondweefsel> Pogledano 24.09.2018.
- [9] Antonović, A.: *Kemija drva, Dio I.*, Interna skripta, Šumarski fakultet, Zagreb, 2008.
- [10] Antonović, A.: *Kemija drva, Dio II.*, Interna skripta, Šumarski fakultet, Zagreb, 2008.
- [11] Green, David W., Winandy, Jerrold E., Kretschmann, David E.: *Mechanical properties of wood*, Forest Products Laboratory, Department of Agriculture, Madison, WI, 1999.
- [12] Skaar, C.: *Wood-water relations*, Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 1988.
- [13] Unger, A., Schniewind, A.P., Unger, W.: *Conservation of wood artifacts*, Springer, Berlin, 2001.
- [14] Kollmann, Franz F.P., Côté Jr., Wilfred A.: *Principles of wood science and technology, I Solid Wood*, Springer, Verlag New York Inc., 1968.
- [15] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Youngov\\_modul\\_elasti%C4%8Dnosti](https://hr.wikipedia.org/wiki/Youngov_modul_elasti%C4%8Dnosti) Pogledano 02.10.2018.
- [16] Ivušić, V., Franz, M., Španiček, Đ., Ćurković, L.: *Materijali I*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [17] <https://www.wood-database.com/wood-articles/modulus-of-elasticity/> Pogledano 13.10.2018.
- [18] [https://www.engineeringtoolbox.com/timber-mechanical-properties-d\\_1789.html](https://www.engineeringtoolbox.com/timber-mechanical-properties-d_1789.html) Pogledano 17.10.2018.
- [19] Bratanović, I.: *Izrada i bađdarenje aparature za određivanje modula elastičnosti materijala*, Završni rad, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2015.

- [20] Divós, F., Tanaka, T.: *Relation between static and dynamic modulus of elasticity of wood*, Institute of Wood and Paper Technology, University of West Hungary, Sopron, Hungary, Forestry and Forest Products Research Institute, Tsukuba, Japan, 2005.
- [21] Zhou, Z., Zhao, M., Wang, Z., Wang, B. J., Guan, X.: *Acoustic Testing and Sorting of Chinese Poplar Logs for Structural LVL Products*, Faculty of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Jiangsu, China, 2013.
- [22] Pečur, I. B., Štirmer, N., Galić, J.: *Ispitivanja polimerom modificiranog betona nerazornim metodama*, Građevinski fakultet, Zagreb, 2009.
- [23] <http://www.mahoganyinc.com/blog/millwork/the-acoustic-properties-of-wood/> Pogledano 25.10.2018.
- [24] Wegst, U.G.K.: *Wood for sound*, Max-Planck-Institut für Metallforschung, Germany, 2006.
- [25] <https://www.docsity.com/sr/akusticna-svojstva-drвета/553576/> Pogledano 28.10.2018.
- [26] <http://www.violinsrakic.co.rs/htm/instrumenti/kvartet.html> Pogledano 15.11.2018.
- [27] <https://www.glasbena-sg.si/harfa/> Pogledano 15.11.2018.
- [28] <http://www.artist.ba/mex/artikal.php?art=8269> Pogledano 15.11.2018.
- [29] <http://www.tritonius.hr/kratka-povijest-klavira-iii-dio-cembalo/> Pogledano 15.11.2018.
- [30] <https://www.gear4music.si/sl/Pihala-trobila-godala/Rosedale-profesionalna-oboa-trup-iz-ebenovine-od-Gear4music/GZG> Pogledano 15.11.2018.
- [31] <https://www.shutterstock.com/search/fagot> Pogledano 15.11.2018.
- [32] [https://www.thomann.de/de/bergerault\\_vibraphone\\_va\\_a442hz.htm](https://www.thomann.de/de/bergerault_vibraphone_va_a442hz.htm) Pogledano 15.11.2018.
- [33] ISO 13061 (2014.) Physical and mechanical properties of wood- test methods for small clear wood specimens. International Organization for Standardization, Geneva

## **PRILOZI**

### **I. CD-R disc**